



Escuela  
Politécnica  
Superior

# Estructuras preflectadas



Grado en Fundamentos de la Arquitectura

## Trabajo Fin de Grado

Autor:

Eduard Terol Anduix

Tutor/es:

Antonio Maciá Mateu

Julio 2019



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



Agradecimientos a todas las personas que han estado cada día conmigo, dándome fuerzas y apoyándome. Además de a la Universidad y a todos los profesores que han influido en mi desarrollo durante el transcurso de la carrera y de este trabajo.



# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	11
FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS PREFLECTADAS .....	16
Definición como concepto y significado .....	16
Definición técnica.....	16
Fase de diseño .....	18
EVOLUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS PREFLECTADAS .....	21
Recorrido al largo de la historia .....	21
Pre-flexión.....	21
Pretensado-hormigón.....	22
Influencias .....	23
APROXIMACIÓN AL CÁLCULO: GENÉRICO .....	31
Fase inicial de diseño .....	31
Resistencia y estabilidad .....	33
Acciones .....	33
Esfuerzos .....	34
Aptitud al servicio .....	37
Desplazamiento vertical .....	37
Desplazamiento horizontal .....	38
Relación de parámetros .....	38
APROXIMACIÓN AL CÁLCULO: MAGIC TABLE .....	41
Programa funcional .....	42
Características técnicas.....	42
Aproximación al cálculo .....	44
Cargas permanentes.....	45
Cargas variables.....	45
Análisis y conclusiones .....	45
PROYECTO-PROPUESTA.....	57

Propuesta y emplazamiento.....	57
Programa .....	58
Análisis estructural.....	59
Forjados convencionales.....	62
Soportes .....	62
Cubierta preflectada.....	63
Aproximación al cálculo .....	64
Cargas permanentes.....	65
Cargas variables.....	65
Análisis .....	66
Discusión.....	69
CONCLUSIONES .....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	73
BIBLIOGRAFÍA DE IMÁGENES.....	77
ANEXOS.....	82

# ÍNDICE DE IMÁGENES

01. Mudhif.....	12
02. Yurta.....	12
03. Magic Table .....	13
04. Architecture as Air .....	13
05. Pabellón de Japón de 2008 .....	13
06. KAIT Workshop.....	13
07. Estructura preflectada emparejada. Fase 0: Estado inicial con los tensores. Fase 1: Búsqueda de la forma. Fase 2: Introducción carga exterior.....	17
08. Catenaria descrita por una cadena.....	19
09. Comparación de los valores .....	20
10. Mudhif iraquí .....	21
11. Yurta mongola en construcción.....	21
12. Estructura preflectada por gatos hidráulicos en rehabilitación.....	22
13. Hormigón pretensado con armadura sin activar.....	23
14. Contra flecha producida por la armadura activa .....	23
15. Puente Blanco.....	25
16. Torres Kio .....	26
17. Torres Colón.....	26
18. Construcción .....	26
19. Standard Bank .....	26
20. Banco de Bilbao en Madrid.....	27
21. Sección Banco de Bilbao.....	27
22. U.N. City en Viena.....	27
23. Vista interior Pabellón de Japón.....	28
24. Vista exterior Pabellón de Japón.....	28
25. Dibujos de arquitecto .....	28
26. Vista interior KAIT Workshop .....	29
27. Planta KAIT Workshop.....	29
28. Vista exterior KAIT Workshop.....	29
29. Architecture as Air .....	30
30. Dibujo del arquitecto .....	30
31. Architecture as Air durante la exposición .....	30
32. Pretensado de la armadura en una viga de hormigón.....	32
33. Simplificación estructura preflectada.....	34

34. Prontuario carga uniforme.....	35
35. Prontuario momentos en los extremos .....	35
36. Comportamiento cortante y flector estructura preflectada .....	35
37. Igualación de los momentos positivos (cargas) y negativos (contra flecha) para obtener la flecha igual a 0 .....	36
38. Momento flector en una estructura preflectada.....	37
39. Esquema de desplazamientos en una estructura preflectada .....	38
40. Esquema: resumen de los parámetros de diseño .....	40
41. Esquema alzado Magic Table .....	41
42. Esquema planta Magic Table .....	42
43. Esquema distribución de fuerzas Magic Table.....	43
44. Construcción tablero Magic Table .....	44
45. Magic Table exposición .....	45
46. Prontuario carga uniforme.....	47
47. Prontuario momentos en los extremos .....	47
48. Comportamiento cortante y flector estructura preflectada .....	47
49. Axonometría modelo 0.....	48
50. Alzado modelo 0 .....	48
51. Alzado modelo 1 .....	49
52. Alzado deformado modelo 1 .....	49
53. Axonometría modelo 1 .....	49
54. Axonometría deformada modelo 1.....	49
55. Alzado modelo 2 .....	50
56. Alzado deformado modelo 2.....	50
57. Axonometría modelo 2.....	50
58. Axonometría deformada modelo 2.....	51
59. Alzado modelo 3 .....	51
60. Alzado deformado modelo 3.....	51
61. Axonometría modelo 3.....	52
62. Axonometría deformada modelo 3.....	52
63. Alzado modelo 4 .....	53
64. Alzado deformado modelo 4.....	53
65. Axonometría modelo 4.....	53
66. Axonometría deformada modelo 4.....	53
67. Modelo de acero .....	54
68. Modelo de aluminio .....	54



69. Modelo de acero cargado .....	54
70. Modelo de aluminio cargado.....	54
71. Planchas fuera de la base después de ser cargadas.....	55
72. Mapa aéreo de Agres.....	56
73. Planta tipo de la vivienda .....	57
74. Alzado Norte .....	58
75. Alzado Sur.....	59
76. Alzado Este .....	59
77. Alzado Oeste .....	59
78. Axonometría vivienda.....	60
79. Axonometría estructural.....	60
80. Esquema trabajo de los soportes .....	62
81. Estructura de cubierta preflectada .....	62
82. Estructura de cubierta con los soportes traccionados.....	63
83. Esquema cargas permanentes.....	64
84. Esquema cargas variables.....	65
85. Esquema de cortantes sin mayorar .....	66
86. Esquema de momento flector sin mayorar .....	66
87. Esquema de cortantes mayorados .....	67
88. Esquema de momento flector mayorado .....	67



*"No hay razón para no probar algo nuevo solo porque nadie lo haya intentado antes"*

Antoni Gaudí



## INTRODUCCIÓN

*"El computador sólo puede calcular lo que ya está conceptualmente dentro de él; en los computadores sólo encuentras lo que buscas. Sin embargo, con la experimentación libre se puede encontrar lo que no se ha buscado."*Frei Otto, Ganador Pritker Prize 2015 <sup>L14</sup>

Las estructuras preflectadas en la edificación es un método constructivo que, a pesar de los múltiples beneficios que puede aportar, no es muy conocido y aún necesita bastante desarrollo para su plena utilización en arquitectura. Al decir que no es muy conocido nos referimos, como ya ha ocurrido con infinidad de “descubrimientos” a lo largo de la historia, a que no se tiene un amplio conocimiento sobre su cálculo, ya que varía algo y se vuelve más complejo respecto a una estructura convencional.

Es importante destacar en el inicio de este trabajo que no existe un único tipo de preflexión con una manera de cálculo y unas premisas que se han de cumplir en un edificio para que se considere estable a la hora de su construcción.

Ahora bien, a modo de introducción se pretende acercar al lector a esta tipología estructural que existe en la arquitectura. Aportando una nueva visión sobre las estructuras preflectadas o pretensadas, que son más conocidas, no viéndolo tan sólo como un problema estructural si no que va más allá del elemento que sostiene el edificio. Los conocimientos requeridos no sólo serán estructurales si no que muchas veces existen otros problemas que crean las dificultades para la construcción de dichas edificaciones.

Las estructuras preflectadas o pretensadas no son algo que haya aparecido en el siglo XIX como un simple avance tecnológico, si no que ya en la antigüedad se pueden ver algún tipo de construcciones como la yurta o el mudhif, que surgieron como una respuesta a la escasez de material en algunas zonas como Mongolia o Iraq en ciertos momentos de la historia. En cambio, es a partir del siglo XX cuando se empiezan a utilizar las estructuras pretensadas, sobretudo en obras y en infraestructuras de ingeniería, y, más adelante, las estructuras preflectadas en proyectos de arquitectura, aunque existan pocos ejemplos.



01. Mudhif



02. Yurta

Con esto lo que se pretende hacer es comenzar este trabajo sobre las estructuras preflectadas planteándola como una tipología tan válida como las otras, y no concebirla como un problema estructural complejo. Al igual que se utilizan estructuras trianguladas, de tela o en altura, la edificación mediante estructuras preflectadas puede ser una nueva oportunidad que se plantea para optimizar la eficiencia de la estructura y el consumo de material. A pesar de tener pocas obras de edificación construidas y ser una tipología bastante reciente tiene varias posibilidades beneficiosas que podrían continuar investigándose.

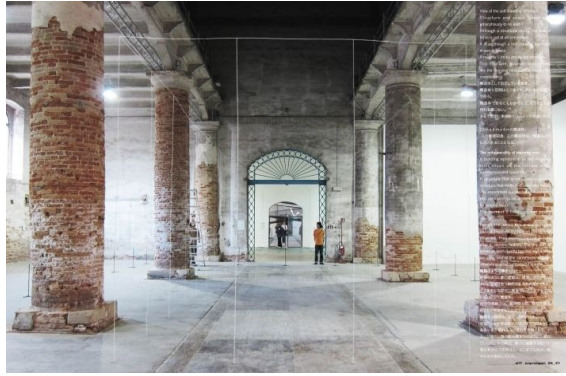
Este tipo de estructuras son relativamente aplicables a un diseño realizado previamente, siempre que se respeten ciertos parámetros, aunque siempre es mejor tener planteado el uso de las mismas para incluirlas en el proyecto. Este hecho va a evitar que se limiten las posibilidades y así modificar el diseño completo del proyecto.

La mayoría de proyectos preflectados provienen de arquitectos alemanes o japoneses, que son los que más se han centrado en desarrollar esta tipología estructural. A excepción de pocos proyectos, las estructuras preflectadas se han utilizado para obras destinadas a la exposición en museos y bienales, más que a la edificación.

Algunos ejemplos de obras preflectadas son Magic Table o Architecture as Air, como obras de exposición destinadas al interior, o el Pabellón de Japón de 2008 o el KAIT Workshop, como construcciones exteriores que soportan más tipos de carga y más cercanas a lo que puede ser un edificio diseñado por un arquitecto.



03. Magic Table



04. Architecture as Air



05. Pabellón de Japón de 2008



06. KAIT Workshop

Aún queda mucho por descubrir, variando la escala hasta ahora utilizada, optimizar las soluciones constructivas para mejorar el comportamiento de la estructura, diseñar estructuras adecuadas para cada tipo de esfuerzo,... la imaginación debe ser algo que no tiene límites siempre y cuando luego se busque el modo de conseguir crear aquello que se diseñe. Como algún encargo que le hizo Frank Lloyd Wright a Torroja buscando el modo de resolver su diseño sin modificar la esencia del mismo y respetar al máximo la idea de proyecto.

Con los edificios con estructuras preflectadas se pueden traer una serie de avances técnicos para mejorar el funcionamiento y el confort de los usuarios en la edificación, como por ejemplo el ascensor en su momento.

Los pioneros en aproximarse fueron los alemanes, concretamente Frei Otto con sus colaboradores en la Universidad de Stuttgart. Realizaron un amplio estudio sobre los materiales a utilizar, la búsqueda de la forma de la contraflecha, la forma más óptima... Otto siempre buscó la máxima eficiencia en sus proyectos llegando a cuestionar las construcciones más contemporáneas de espacios demasiado amplios:

*"Podemos construir edificios de dos o tres kilómetros de alto y diseñar auditorios inmensos y cubrir una ciudad entera, pero tenemos que reflexionar qué función tiene todo ello. ¿Es realmente lo que la sociedad necesita?"*Frei Otto <sup>L14</sup>

Dicho esto, se procede a comenzar el trabajo de "Estructuras preflectadas". Su elección se basa en una fase de aprendizaje basada en entender cómo trabaja una estructura desde el punto de vista global. En esta búsqueda por entender el funcionamiento estructural, uno es capaz de comprender determinados puntos y razonamientos que conlleva cualquier diseño de una estructura, trabajándolas por partes a una escala pequeña. Por lo que el interés en este trabajo radica no sólo en obtener una base de conocimiento sobre una de las construcciones que están en auge desde principios de siglo, viendo cómo se ha empezado a desarrollar y lo que puede suponer en la historia de la arquitectura, sino también en llegar a entender cómo trabaja una estructura en su conjunto, a nivel global. Poder llegar a unir y fusionar todos los conocimientos adquiridos durante las diversas asignaturas relacionadas con las estructuras en la Universidad y saber llevarlos a la práctica en casos reales. Saber utilizarlos para interpretar y entender las soluciones elegidas y el motivo por el cual se ha llegado a la utilización de ellas.

La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo se basa, primeramente, en aproximar al lector a una posible definición sobre lo que se entiende por una estructura preflectada, tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista histórico. Viendo como se ha ido conformando el término y los factores que han intervenido en él. Para con ello se va a tomar como ejemplo una construcción existente, en este caso el proyecto de Junya Ishigami llamado Magic Table, analizar su comportamiento estructural y realizar una aproximación al cálculo, verificando cada uno de los parámetros descritos en la definición inicial del modelo estructural. Finalmente, mediante todos los conocimientos adquiridos, se planteará una propuesta de posible edificación que contenga una estructura preflectada, fusionando la etapa de diseño, programa y estructura pero verificando todos los parámetros anteriores.

*definición → parámetros → análisis estructural → propuesta*

Una vez establecida la metodología a seguir, el trabajo empezará definiendo que se entiende por estructura preflectada. Viendo cuales son los parámetros que influyen en su diseño clasificándolas desde las premisas establecidas por el Código Técnico de la Edificación: resistencia y estabilidad, estados límites últimos, y aptitud al servicio, estados límites a servicio. Apareciendo de esta manera una serie de parámetros que han de tenerse en cuenta a la hora de diseñar cualquier construcción que se considere dentro de esta tipología.



Con ello aclarado, se continuará el trabajo con un breve recorrido histórico sobre cómo ha ido evolucionando esta tipología estructural, tanto desde el punto de vista del avance en los conocimientos y en el cálculo estructural, como en las distintas tipologías que están presentes en la edificación actual. Con toda la evolución analizada, el trabajo continuará con el análisis de un caso práctico llevado a la realidad: Magic Table de Junya Ishigami. Con una aproximación al cálculo a partir del programa informático SAP2000 y una simplificación, tanto del modelo estructural como de las cargas, uniendo dicha información con aspectos y técnicas constructivas llevadas a cabo en este campo.

Finalmente, a modo de anexo, se planteará una propuesta sobre un proyecto de nueva planta que contenga en su uso la tipología estudiada. Observando la dificultad de cumplir los requisitos impuestos por la normativa, por la estructura y por el programa. Con una nueva vivienda unifamiliar que pueda ser totalmente funcional para su uso.

## FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS PREFLECTADAS

### Definición como concepto y significado

Para poder diferenciarse de otras tipologías estructurales aclararemos que el preflectado o pretensado es una técnica empleada para mejorar el comportamiento de un material o una estructura introduciendo tensión previa a la puesta en carga del mismo. Este método es relativamente novedoso y no ha tenido un gran número de ejemplos en la arquitectura. La visión que da es de un avance tecnológico, que llama la atención y despierta asombro y admiración, ya que llega casi al nivel de ser algo mágico.

### Definición técnica

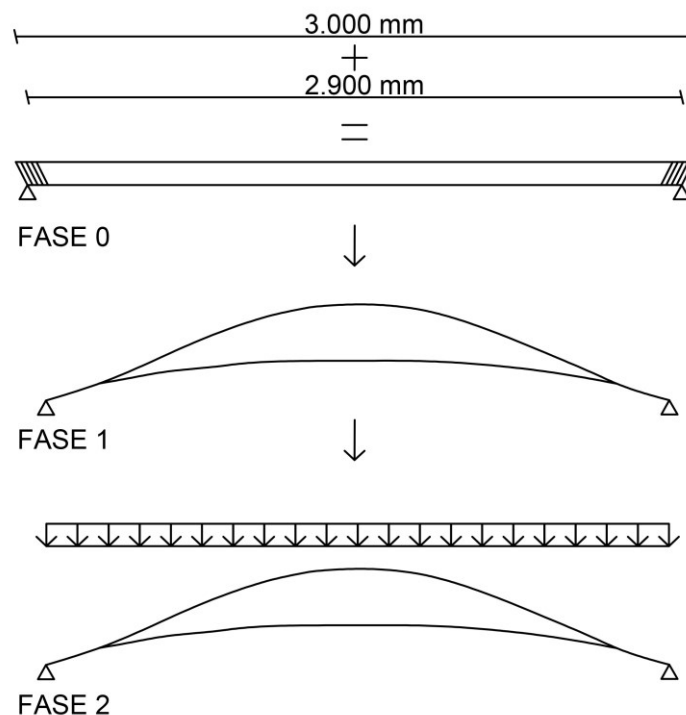
Desde el punto de vista técnico, el análisis estructural de una estructura generada por elementos preflectados debe ser congruente a su modo de construcción. Es muy importante tener esto en cuenta ya que la preflexión se utiliza con materiales dúctiles que tengan un límite plástico que permita la deformación del mismo. Así, los materiales más utilizados son los metálicos, sobretodo acero y aluminio, aunque este segundo en menor medida y solo en exposiciones. Constructivamente se parte de elementos planos, y se les va añadiendo de manera progresiva una carga exterior hasta conseguir la forma deseada. Este proceso se denomina búsqueda de la forma. Otra forma de realizar este proceso sería diseñar directamente una pieza con la forma y la contra flecha deseada y mandar que se fabrique.

Según Chris Williams (2000), profesor del Departamento de Arquitectura e Ingeniería Civil de la Universidad de Bath (Inglaterra), la obtención de la forma (form finding), es el proceso mediante el cual se configura una geometría estructural capaz de soportar una carga. Una vez preflectados y ensamblados, los elementos que forman la estructura ya están listos para poder soportar las cargas para los que han sido proyectados. Frei Otto previamente define el proceso de obtención de la forma como:

*"... un proceso donde la estructura es planificada y desarrollada. En cada fase, la forma de la estructura es tangible y visible. Un proceso de obtención de la forma (form finding) es un proceso interactivo optimizado. Cada fase provee una forma inicial que se convierte en la base para la siguiente fase. El criterio para este proceso de optimización es determinado por la relación entre la forma, la construcción y la función de la estructura."*<sup>16</sup>

Durante la fase de búsqueda se introducen tensiones internas que no pueden ser despreciables. Al tratarse de elementos con geometrías no lineales se necesita utilizar el Método de los Elementos Finitos para poder distinguir las tensiones producidas por la fase de búsqueda de carga y las tensiones propias de la puesta en carga de la estructura. También se deben tener en cuenta los desplazamientos y las rotaciones que se generan durante la presencia de acciones al modificar las distancias en la geometría del sistema.

Así pues, podemos obtener una clasificación muy simple de las estructuras preflectadas basándonos en el modo en el que se consiguen los esfuerzos. De esta manera se pueden diferenciar las estructuras que producen esfuerzos externos, es decir, necesitan tener apoyos, y las estructuras que se mantienen en equilibrio con las cargas que se les han introducido para crear la deformación, es decir, no generan reacciones externas. Este último caso solo se puede conseguir con elementos preflectados emparejados, los cuáles se mantienen en equilibrio gracias a que uno de ellos se encuentra traccionado, mientras que el otro se encuentra comprimido.



07. Estructura preflectada emparejada. Fase 0: Estado inicial con los tendones. Fase 1: Búsqueda de la forma. Fase 2: Introducción carga exterior.

Según se regula en el “Código Técnico de la Edificación”, actual normativa española, el objetivo básico de una estructura que debe cumplir un edificio es asegurar un comportamiento estructural adecuado frente a acciones e influencias externas a las que se puede ver sometido, tanto durante

su vida útil como durante se construcción. La norma establece una serie de exigencias de obligatorio cumplimiento para poder garantizar este adecuado comportamiento, donde tenemos:

- Exigencia básica SE1: para garantizar la resistencia y la estabilidad frente a las acciones e influencias previsibles. La estructura no debe caerse ni romperse, y para esto se calcularán los estados límites últimos (ELU).
- Exigencia básica SE2: garantizando la aptitud al servicio conforme al uso previsto en el edificio de forma que no se produzcan deformaciones inadmisibles. La estructura no debe moverse más de lo permitido para su uso, y se calcularán los estados límites de servicio (ELS) para garantizarlo.

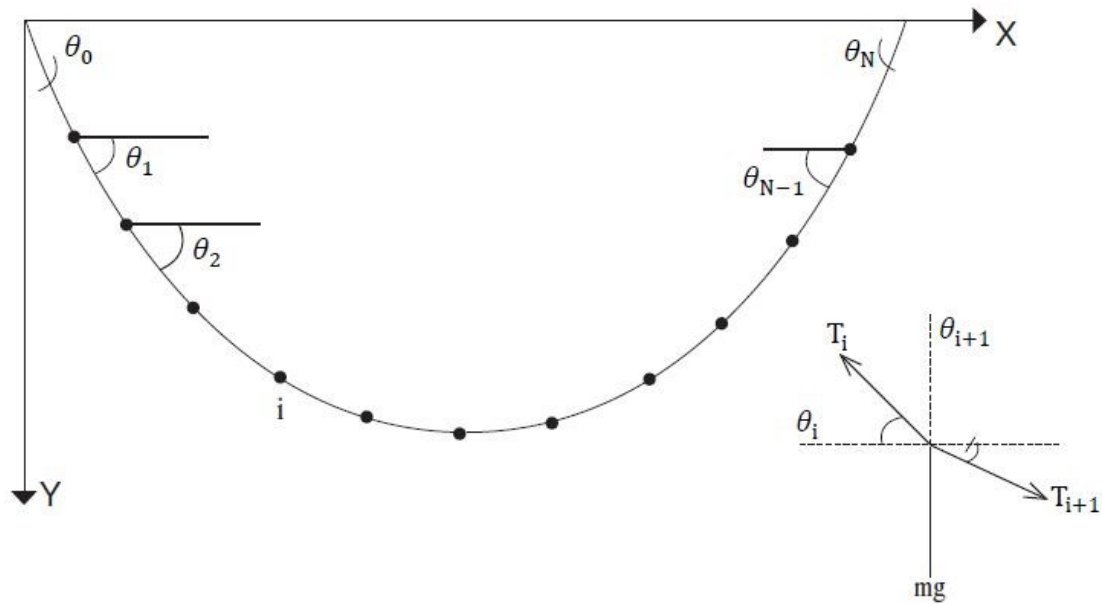
En este segundo apartado se expone, brevemente, la utilización de las contraflechas con el fin de mantener la apariencia geométrica de la estructura, y limitar las desviaciones por deformaciones de la misma. La contraflecha se considera, a efectos de la comprobación, un efecto favorable a reducir el valor de la flecha activa o de la flecha máxima, siempre que queden reflejados todos los elementos afectados en los planos del proyecto y se controlen de manera adecuada durante el proceso de construcción. <sup>N1</sup>

En base a esta clasificación, se nos presentan los diferentes parámetros que se deben tener en consideración a la hora de diseñar la estructura de cualquier edificio. Nos centraremos en la fase inicial de diseño, parámetros en relación con la estabilidad y resistencia del sistema estructural, y parámetros relacionados con la aptitud al servicio.

## Fase de diseño

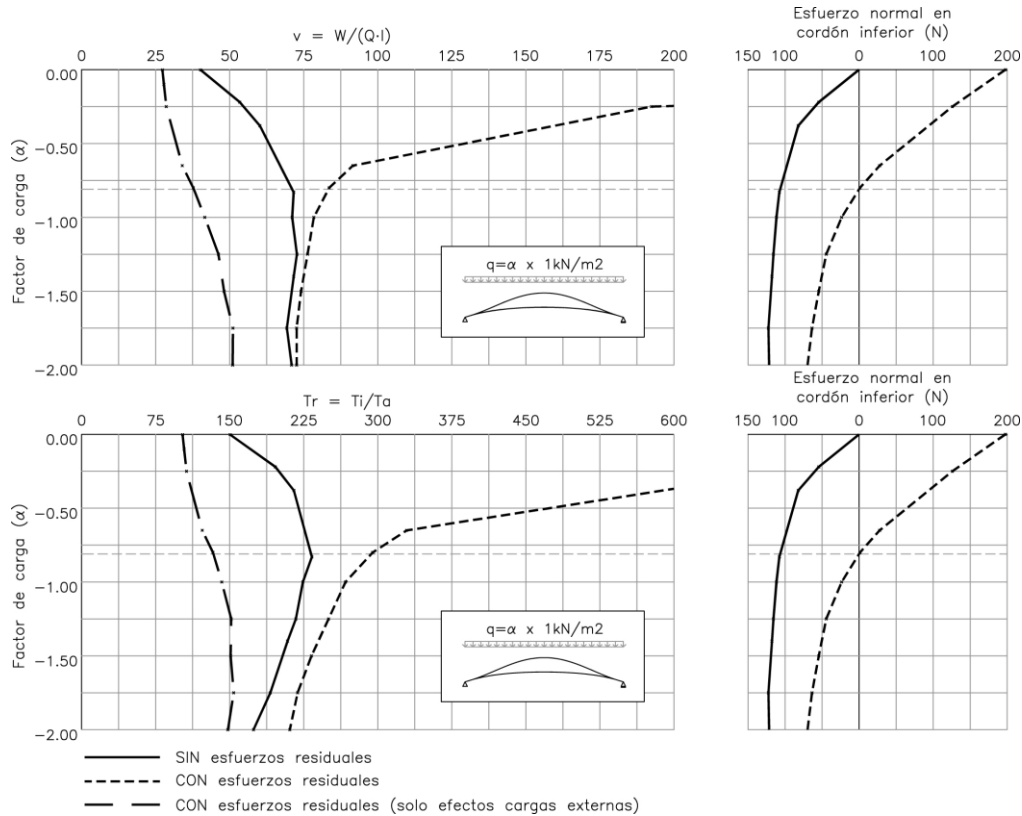
En la fase de diseño de una pieza pretensada se determinan las características geométricas de la sección (área, momento de inercia, momento resistente a la flexión y a la torsión) y la resistencia de la misma (a flexión, a tracción y a compresión con sus módulos de elasticidad y de rotura), así como el tipo de preflexión, la fuerza del pretensado necesario y el trazado de las armaduras activas, en caso de que las tuviese. Dependiendo de estos parámetros se obtendrán unas contra flechas diferentes, que podrá resistir con más facilidad un tipo de cargas u otro.

El elemento más importante a tener en cuenta en esta fase es la contra flecha, ya que es lo que caracteriza a las estructuras preflectadas y lo que las diferencia de las estructuras convencionales. Existen diversas maneras de definir una contra flecha: se pueden aportar tensiones externas, o bien de tracción fuera del eje de simetría como pasa en el hormigón pretensado, o bien aplicando una flexión negativa en los bordes del vano, o se puede diseñar una pieza con la forma de la contra flecha, es decir, con una flecha positiva parecido a la forma de la anti catenaria.



08. Catenaria descrita por una cadena

Las dos opciones tienen un comportamiento similar, siendo la gran diferencia la transmisión de cargas a los soportes. En el caso del aporte de fuerzas externas es necesario tener en cuenta estas tensiones internas, mientras que en una pieza diseñada a priori no se transmiten esfuerzos inicialmente, exceptuando el peso propio como ocurre con una estructura convencional.



09. Comparación de los valores

Para estas condiciones de diseño los valores de los conceptos analizados de las soluciones con tensiones residuales y sin ellas tienden a igualarse, mientras que las deformaciones son menores para las soluciones preflectadas.

## EVOLUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS PREFLECTADAS

### Recorrido al largo de la historia

El diseño estructural de las estructuras preflectadas ha sido utilizado al largo de la historia, y sobre todo desarrollado a partir del siglo XX, aunque su desarrollo viene impulsado por otro descubrimiento: el pretensado. Vamos a realizar un recorrido donde se pueda observar las similitudes de las dos tipologías estructurales y las influencias que han podido tener en el mundo de la arquitectura.

### Pre-flexión

La exploración de elementos curvados elásticamente que originalmente eran planos para la obtención de superficies generalmente utilizadas en cubiertas se remonta a hace unos seis mil años de antigüedad.

Por ejemplo en el mudhif en Iraq o en la yurta en Mongolia se pueden encontrar los principios de la eficiencia y el control del consumo de material en las estructuras. Esto es debido, generalmente, a que en las zonas donde se realizan estos proyectos existe una escasez de material, como puede ser la madera, o en las culturas donde no se han desarrollado aún técnicas propias de carpintería para la creación de otro tipo de estructuras con más utilización de material.



10. Mudhif iraquí



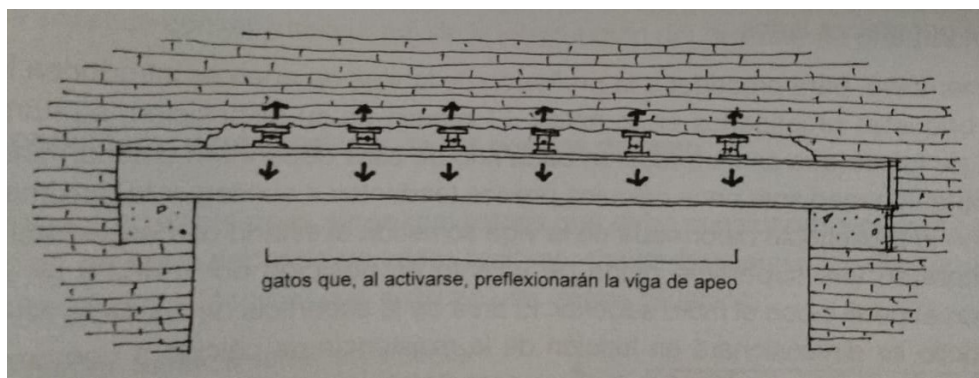
11. Yurta mongola en construcción

A parte de estos ejemplos de la antigüedad, las estructuras preflectadas no se han utilizado mucho hasta los inicios del siglo XXI, y esto queda patente con los pocos ejemplos arquitectónicos que se tienen durante todo el siglo XX. El uso de esta tipología ha aumentado en las últimas dos décadas de manos de algunos arquitectos japoneses y de un grupo de arquitectos e ingenieros alemanes de la Universidad de Stuttgart, que han rescatado este método constructivo con la finalidad de informatizar la fase inicial de búsqueda de la forma y, de esta manera, poder tener un mayor control sobre el cálculo y la forma final de la estructura. <sup>A3</sup>

La preflexión también se ha utilizado en rehabilitación, para cuando se debe acometer un apeo comprometido, tanto por la longitud de la luz a abrir como por las cargas que tendrá que recibir, con el fin de minimizar el riesgo de fisuración de los muros superiores que gravitan sobre la nueva perfilera horizontal.

Al introducir una preflexión adecuada en el perfil horizontal de apeo, de manera que este se vea obligado a deformarse hacia abajo, con la misma magnitud que tendría la flecha definitiva cuando el mecanismo de apeo hubiera entrado en carga, contando las cargas permanentes y únicamente una sobrecarga de uso del orden del 40 o del 50%.

Esta operación se realiza mediante gatos hidráulicos, y será la propia fábrica la que determine el momento en que pueda interrumpirse la preflexión. Esto debería producirse cuando el análisis tensional provocado por las fuerzas actuantes hacia arriba, introducidas por los gatos, superase los valores de la resistencia de cálculo que admite la fábrica, o cuando se detecte la más mínima aparición de fisuras con trazado inverso.<sup>L6</sup>



12. Estructura preflectada por gatos hidráulicos en rehabilitación

## Pretensado-hormigón

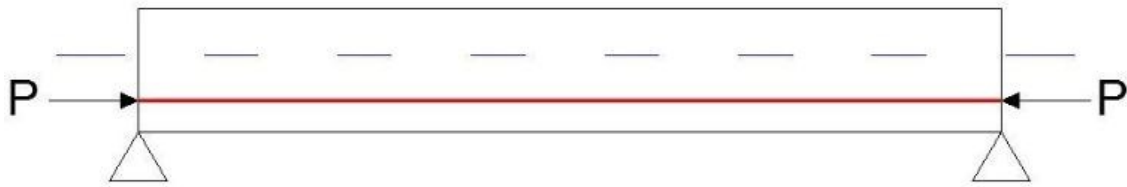
Pero decir que no se ha trabajado ni tratado con la preflexión durante tantos siglos no sería exactamente correcto. En todo este tiempo han existido diversos sistemas, como el pretensado del hormigón, que sirven como aproximación al cálculo y a la utilización de las estructuras preflectadas en la arquitectura.

El pretensado es un principio que sí que se ha utilizado para aplicaciones convencionales de nuestro día a día como pueden ser la sierra de arco, la rueda de bicicleta, el barril de madera o el bloque de libros.

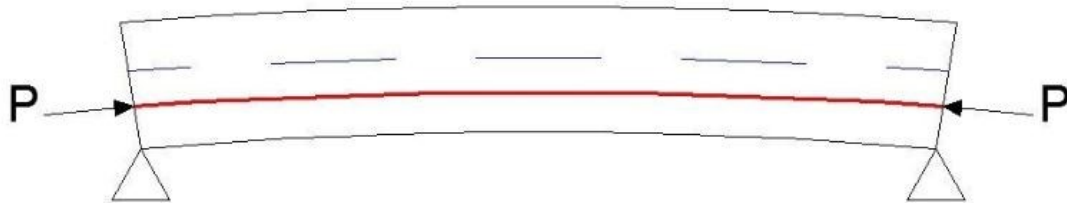
En el caso de las estructuras de edificación nos encontramos con el pretensado del hormigón. Este sistema se basa en que cuando fragua el hormigón, se adhiere a las barras de las armaduras de acero que han sido tensadas previamente y, al liberar la tensión, se transfiere de manera directa al hormigón en forma de compresión por medio del rozamiento. Esto provoca una deformación del



elemento al que se transmite la carga (hormigón) y, si el pretensado se aplica a la cara inferior, se produce una contra flecha, es decir, una flecha contraria a la que se produciría si se sometiese a cargas gravitatorias.



13. Hormigón pretensado con armadura sin activar



14. Contra flecha producida por la armadura activa

La primera utilización de este método data de 1886 en Estados Unidos como prueba de unión entre dos bloques. Más adelante, en 1920, fue patentado por el ingeniero francés Eugène Freyssinet. En España fue introducido por Eduardo Torroja, y ambos fundaron la Federación Internacional del Pretensado (FIP) en 1952, que se convirtió en el organismo técnico regulador. La técnica, con la escasez de acero después de la Segunda Guerra Mundial, se empezó a utilizar más frecuentemente y se ha ido mejorando hasta nuestros días. <sup>B8</sup>

Principalmente este método de pretensado se ha utilizado en las infraestructuras de ingeniería civil. Más adelante se empezó a utilizar en los forjados de edificios donde se observó que mejoraba la aptitud al servicio.

Respecto a las características, el hormigón pretensado tiene mayor resistencia a la corrosión del acero al verse sobre las barras ya tensadas. Esto, junto al proceso de transferencia de la tensión son los dos principales motivos por el que actualmente se suelen prefabricar en un taller y luego transportados a obra. Esto también provoca que terminen siendo elementos pequeños que sean fáciles de trasladar, como viguetas, placas alveolares o muros prefabricados, aunque también se utilizan en grandes obras civiles. <sup>A2</sup>

## Influencias

Como antecedentes importantes se pueden mencionar los trabajos vinculados al sistema estructural referido que corresponden a los prototipos y estudios desarrollados por el Instituto de

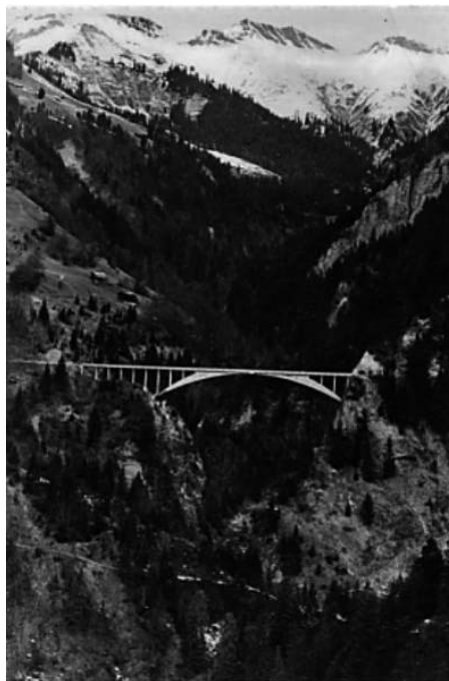
Estructuras Ligeras IL de la Universidad de Stuttgart, destacando las investigaciones de los profesores Frei Otto, Jürgen Henniske y demás miembros del equipo del IL.

También cabe destacar las aportaciones de ingenieros, como Robert Maillart, en la construcción de puentes y otras infraestructuras civiles.<sup>L4</sup>

*"El hormigón pesado de las grandes construcciones romanas puede ponerse a dieta si encontramos la manera de canalizar sus esfuerzos. Si el arco es el antifunicular de las cargas distribuidas y consigo poner músculo allí donde las cargas alternas me alteran el arco básico, puedo quitar mucha grasa del hormigón y ahorrar de paso no solamente material, sino medios auxiliares tan esenciales en la construcción de puentes."*

Robert Maillart

La historia de los puentes es, en gran medida, la historia por suprimir o evitar los medios auxiliares para su construcción. Maillart fue lejos en este asunto y pensó que si el arco fraguado permite ser la sujeción temporal de todo lo que va sobre él, se puede ejecutar una delgada cimbra que se retire en la primera fase, es decir, con tan solo el arco ejecutado. A partir de ahí, la estructura será soporte de sí misma hasta la terminación total del conjunto, y así lo hizo en la construcción de su puente blanco.<sup>R1</sup>



15. Puente Blanco

Las relaciones entre arquitectos e ingenieros siempre han permitido la evolución de los sistemas estructurales. Mientras que el arquitecto se podía permitir imaginar en los proyectos y dejar de

lado los problemas resistentes, siempre había algún ingeniero dispuesto a resolverlo, a un coste no muy excesivo.

Los elementos pretensados se han utilizado también en estructuras resistentes en altura como en las Torres Kio en Madrid. Estos edificios inclinados tienen 26 plantas y un núcleo central vertical que va cambiando su posición a lo largo de las diferentes plantas. El pretensado se ancla en la parte contraria de la cimentación para evitar el vuelco y poder resistir a las fuerzas verticales y horizontales a las que se ve expuesta. <sup>A4 A5</sup>



16. Torres Kio

En Torres Colón se presentan las condiciones más desfavorables para un edificio colgado; se trata de un edificio alto y estrecho, con veinte plantas colgadas. La adopción de tirantes de hormigón pretensado tiene muchas ventajas. No responde ante la carga pasivamente, como les ocurre a los tirantes metálicos, sino que es un soporte activo. El pretensado introduce una deformación de acortamiento que elimina la desnivelación de carga permanente e incluso puede promediarse la de sobrecarga. En el Standard Bank de Johannesburg se utilizan también tirantes de hormigón pretensado, pero se disponen tres plataformas intermedias de las que se cuelga el edificio.



17. Torres Colón



18. Construcción

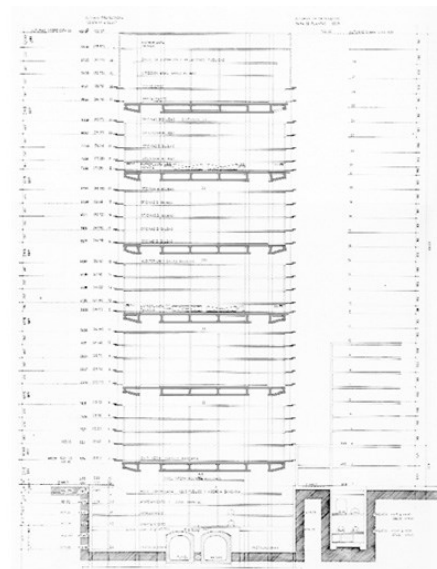


19. Standard Bank

Existen otros edificios que han utilizado el pretensado, en este caso para puentear diferentes núcleos como el Banco de Bilbao o el U.N. City en Viena. El Banco de Bilbao tiene núcleos, separados entre sí 19 m, y se disponen a los lados de unas líneas de ferrocarril subterráneo situado bajo el edificio. Cada bloque está formado por una gran plataforma de vigas de hormigón pretensado de 2 m de canto, que sostiene 5 plantas superiores en estructura metálica. El «U.N. City» de Viena es un conjunto de edificios de oficinas en «Y». La estructura portante vertical está constituida por un núcleo central y tres núcleos en los extremos de los brazos de la «Y». Entre ellos se disponen 3 plataformas de hormigón pretensado que sostienen cada una 5 niveles, salvo la más alta que sostiene 14 plantas. <sup>A4 A6</sup>



20. Banco de Bilbao en Madrid



21. Sección Banco de Bilbao



22. U.N. City en Viena

Centrándonos en la preflexión, se ha utilizado en diversas estructuras pequeñas pero quien lo ha llevado a su máximo exponente en la arquitectura es Junya Ishigami. El mismo arquitecto japonés también ha realizado pequeñas estructuras para exposiciones diseñados como objetos arquitectónicos como Magic Table, proyecto que analizaremos en profundidad más adelante, o el pabellón de Japón en la Bienal de Venecia de 2008, pero es el único que ha realizado 2 proyectos a gran escala que incluyen una estructura preflectada: el KAIT Workshop y el proyecto Architecture as Air para la Bienal de Venecia de 2010.

El Extreme Nature Landscape of Ambiguous Space, pabellón de Japón en la Bienal de Venecia de 2008, consta de 4 invernaderos que trataban de llegar a la igualdad entre arquitectura y paisaje. Los pilares esbeltos cubren una altura considerable, en este caso la proporción de las plantas que habitan en su interior. La cubierta y las fachadas acristaladas tienen la necesidad de aguantar esfuerzos verticales y horizontales que son soportados por los pilares comprimidos o traccionados. Los esquemas de trabajo se basan en calcular la deformada del aspecto del pórtico final deseado, esta deformada se invierte y se construye, teniendo la deformada de la estructura invertida la misma forma que el pórtico inicial. <sup>A1</sup>





23. Vista interior Pabellón de Japón

24. Vista exterior Pabellón de Japón

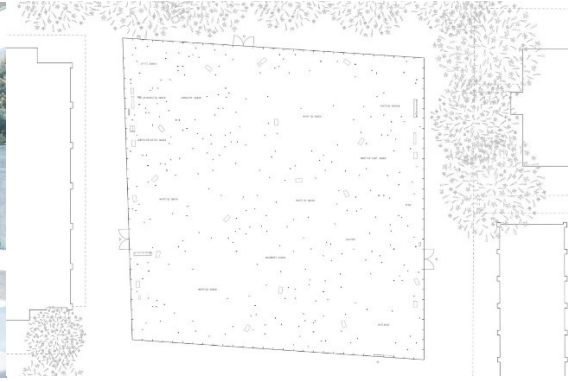


25. Dibujos de arquitecto

El KAIT Workshop es un edificio anexo dentro del campus del Instituto de Tecnología de Kanagawa. Está construido en una sola planta y acoge una función pública dentro del campus. Cuenta con 305 pilares esbeltos colocados aparentemente de manera aleatoria por la planta. Casi ninguno de estos pilares tiene la misma proporción, todos tienen la misma altura y mantienen la sección rectangular pero tienen una proporción y ángulo distintos. Dada la esbeltez para los 5 metros de altura de la planta los soportes se comportan como tensores y no como pilares. Cada nudo entre estructura horizontal y vertical es distinto, es específico para ese pilar concreto. También para conseguir la gran esbeltez de los pilares, estos se distribuyen en dos tipos: los que aguantan las fuerzas verticales y los que aguantan las fuerzas horizontales, los primeros trabajan a compresión y los segundos a tracción. <sup>A1</sup>



26. Vista interior KAIT Workshop

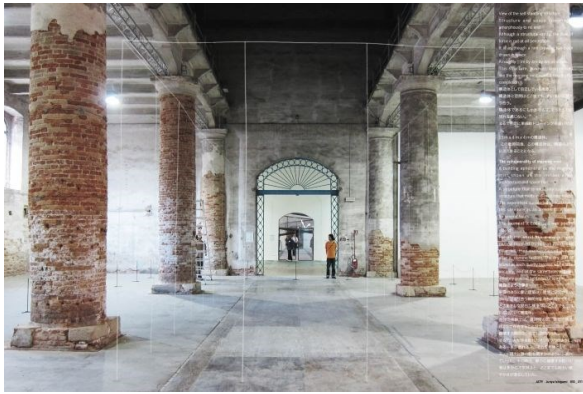


27. Planta KAIT Workshop

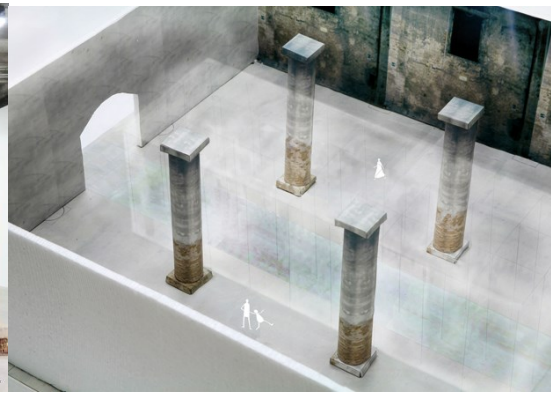


28. Vista exterior KAIT Workshop

Architecture as Air. Study for Château La Coste es el proyecto que presenta en la Bienal de Arquitectura de Venecia de 2010, siendo la instalación más frágil de Ishigami, hasta el punto de que durante la exposición se cayó debido a fuerzas horizontales que originalmente no estaban contempladas. Con pilares de 0,9 mm de diámetro y 6 metros de alto de fibra de carbono define un espacio dentro de otro. Estos pilares se mantienen gracias a unos tensores de 0,2 mm, que son imperceptibles a la vista humana, y, gracias a la tracción por dos lados opuestos, evitan el movimiento de pandeo como ocurre en el puente de Foster en Milleau.



29. Architecture as Air



30. Dibujo del arquitecto



31. Architecture as Air durante la exposición



## APROXIMACIÓN AL CÁLCULO: GENÉRICO

### Fase inicial de diseño

En esta fase inicial de diseño de una pieza pretensada, como ya se ha comentado anteriormente, se determinan las características geométricas y resistentes de la sección, así como los demás parámetros que influyen en la obtención de la contra flecha, y así, facilitar la resistencia de los tipos de cargas que se tengan.

Uno de los aportes de Frei Otto en el campo de la obtención de la forma (form finding) fue desarrollar un método, a través del método de la forma suspendida, para poder deducir los empujes de la estructura.

En estos cálculos no se mayoran las acciones y se utiliza la sección bruta del material que se va a utilizar para la estructura, es decir, el coeficiente de seguridad de la acción del pretensado es  $\gamma=1$  para cualquier material.

Hay que aclarar que el cálculo matemático de las estructuras preflectadas es posible únicamente por métodos aproximados, aunque el estudio del comportamiento estático y la influencia de las tensiones que actúan sobre los componentes estructurales es decisivo tanto para realizar la búsqueda de la forma como para su comportamiento como estructura, ya que en este tipo de estructuras para cada estado de tensión corresponde una deformación. <sup>A6</sup>

Para las comprobaciones de secciones para estabilidad y movimientos, ELU y ELS, se emplean los parámetros que se indican en el CTE, en el caso de madera o acero con sus respectivos documentos básicos, o en la EHE, en caso de tratarse de hormigón.

A la hora de calcular, a grandes rasgos, la contra flecha deseada en una estructura o necesaria para soportar determinadas cargas, se pueden utilizar las ecuaciones de la resistencia de materiales para obtener los momentos que se aplican en los extremos. Con este cálculo se puede estimar de manera aproximada la contra flecha y la carga que se debe aplicar para devolver la pieza al estado inicial y que quede totalmente horizontal.

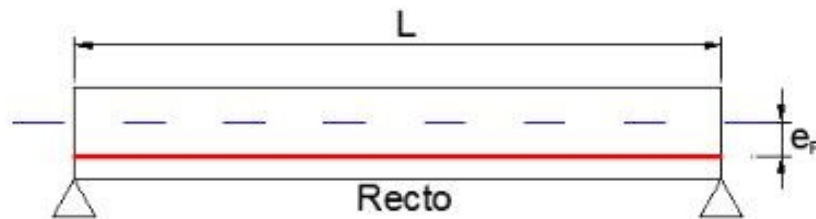
Así la flecha en el centro del vano debido al momento viene dada por:

$$f_{pre} = \frac{M \cdot L^2}{8EI}$$

Siendo:

- M el momento en el vano
- L la luz de la viga
- E el módulo de elasticidad del material de la viga
- I la inercia de la sección transversal

En el caso del hormigón pretensado el momento M se puede obtener con la expresión  $M_p = e_p \cdot P$ , siendo  $e_p$  la excentricidad del pretensado respecto al centro de gravedad de la viga y P la fuerza de tensado.



32. Pretensado de la armadura en una viga de hormigón

Para determinar la carga que pudiese eliminar la contra flecha, se deben igualar las flechas producidas por la fuerza de preflexión y por la carga repartida.

La flecha que produce una carga g uniformemente repartida se calcula como:

$$f_g = \frac{5M_g L^2}{48EI} = \frac{5 \frac{gL^2}{8} L^2}{48EI} = \frac{5gL^4}{384EI}$$

Siendo  $M_g$  el momento provocado por la carga g uniformemente repartida.

Si igualamos las flechas  $f_{pre}$  y  $f_g$ , y aislamos la incógnita g, podremos obtener el valor de la carga que es necesaria para eliminar la contra flecha producida por la preflexión o por el pretensado.

Quedaría de la siguiente manera:

$$f_{pre} = f_g \rightarrow \frac{M_p L^2}{8EI} = \frac{5M_g L^2}{48EI} \rightarrow M_p = \frac{5}{6} M_g = \frac{5}{6} \frac{gL^2}{8} = \frac{5}{48} gL^2 \rightarrow g = \frac{48M_p}{5L^2}$$

En el caso del pretensado, se debe tener en cuenta que las ecuaciones varían dependiendo de la colocación de las armaduras, no es lo mismo una armadura pretensada recta y horizontal que una armadura recta en diagonal o una parabólica. En este caso, las ecuaciones de resistencia de materiales expuestas anteriormente son aplicables a armaduras rectas y horizontales pretensadas en la cara inferior del hormigón, para así poder producir la contra flecha. <sup>P1</sup>

## Resistencia y estabilidad

### Acciones

Tanto los elementos estructurales preflectados como cualquier otro, se ven sometidos a una serie de acciones exteriores que debe ser capaz de soportar. Existen diferentes tipos de cargas que afectan a una edificación, cargas permanentes, cargas variables y cargas accidentales. Las acciones que afectan a una estructura preflectada son las mismas que a una convencional, aunque su efecto es diferente.

Las acciones permanentes son las que se ven afectadas por los pesos propios. En comparación con las estructuras convencionales, la preflexión utiliza la misma cantidad de material y, por lo tanto, tiene el mismo peso. La diferencia viene en la flecha. Mientras que una estructura convencional, dependiendo de la luz y el peso, al colocarse en obra empieza a tener una flecha negativa, una estructura preflectada perderá un poco de la contra flecha debido a este peso propio pero nunca llegará a tener una flecha negativa.

Por otra parte encontramos las acciones variables que, como se especifica en el CTE, en las componentes verticales se pueden simular como aplicaciones de cargas distribuidas de manera uniforme. Estas cargas serán las que provoquen que la contra flecha de los elementos horizontales de la estructura se reduzca, se pierda por completo, o se convierta en una flecha negativa. En el caso de una estructura convencional no se podría tener un movimiento que supere las limitaciones establecidas por la normativa, mientras que en las estructuras preflectadas sí que se podría, siempre que la carga esté aplicada en el sentido contrario de la contra flecha previamente establecida en la fase de diseño.

Respecto a la acción de viento, las normativas nacionales, en nuestro caso el “Código Técnico de la Edificación”, permite una aproximación a su valor. En el caso de las estructuras preflectadas, no se realizan con una altura excesiva, por lo que se puede suponer un cálculo similar al que se realizaría en una estructura convencional.

Otras acciones a tener en cuenta son las que provocan los sismos. Estas fuerzas son más complejas debido a que su valor depende de muchas variables donde entra en juego la estructura, pero también la aceleración del suelo. La masa, la rigidez o el amortiguamiento son variables que, determinadas por los modos naturales de vibración del edificio y sus periodos, tendrán un papel importante para resistir este tipo de acciones. De esta manera a mayor periodo de vibración, más flexible será el edificio y, por lo tanto, mayores serán sus deformaciones al absorber menor cantidad de energía de la fuerza sísmica.

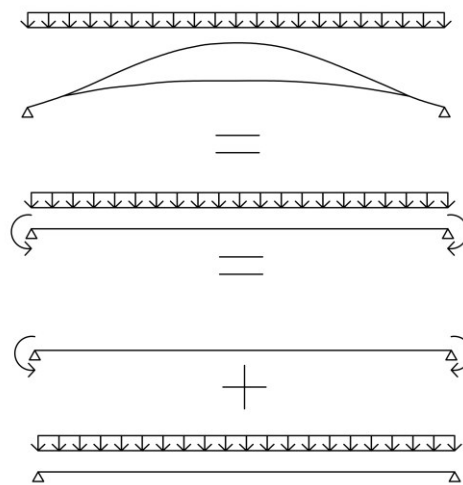
Por la parte de las acciones térmicas, como en cualquier edificio convencional, se deberán disponer de juntas de dilatación siempre que se supere el límite de metros lineales establecido

para el alargamiento y acortamiento de los elementos estructurales. En el caso de la Magic Table de Ishigami no tienen una gran relevancia las acciones térmicas para la elección del material, pero si existe una diferencia entre los dos prototipos respecto a esto, siendo diferentes los coeficientes de dilatación de los materiales, y en otra situación sí sería un aspecto relevante:

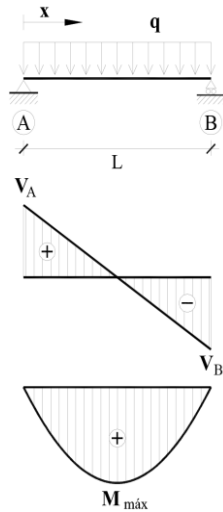
- Aluminio: coeficiente de dilatación =  $24 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$
- Acero: coeficiente de dilatación =  $11 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$

## Esfuerzos

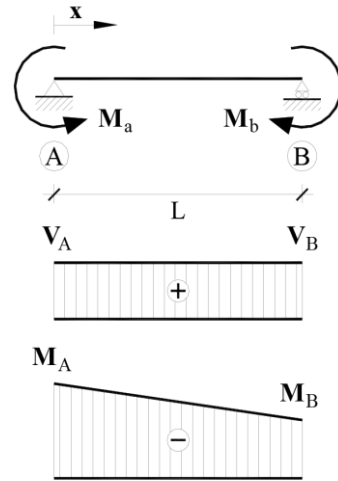
A la hora de trabajar con una estructura con preflexión de un edificio, a modo de simplificación, se podría entender como un pórtico empotrado en su base y con uniones rígidas o articulaciones en los encuentros de elementos verticales y horizontales, dependiendo del modelo estructural, donde se ha aplicado un momento, generalmente negativo, en los nudos superiores. Otra manera de cálculo es considerar un pórtico con una deformación previa en forma de contra flecha o flecha positiva. Los esfuerzos que encontramos en este tipo de estructuras son: axil (elementos verticales), cortante y flector. <sup>L16</sup>



33. Simplificación estructura preflectada

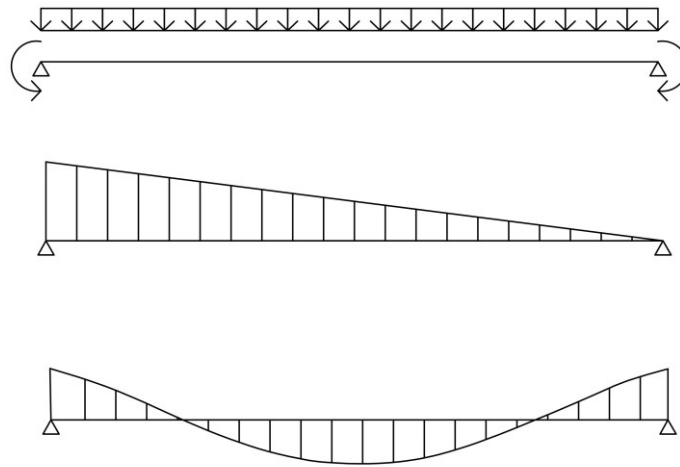


34. Prontuario carga uniforme



35. Prontuario momentos en los extremos

Viendo en cada caso como los puntos más débiles de la estructura son los nudos superiores y el centro del vano, ya que tienen mayor cortante y momento negativo los nudos y mayor momento positivo el vano.



36. Comportamiento cortante y flector estructura preflectada

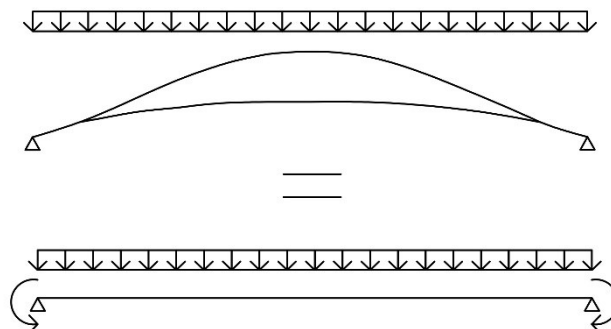
### Cortante

Para poder entender el funcionamiento de la estructura respecto a los esfuerzos, para empezar es importante entender esta estructura como un pórtico empotrado en su base con momento en sus extremos. Al tener momentos, tanto en el vano como en los apoyos, también tendrá cortante aunque este no será tan crítico como el momento flector.

El problema que provoca el cortante en este tipo de estructuras es que afecta a los extremos, en contraposición al momento flector que afecta sobre todo al centro del vano, y por lo tanto, también se deben comprobar. Además, al preflectar el perfil, en los extremos también existe momento, aunque negativo. Esto hace que la sección más desfavorable sean los extremos, ya que contiene momento y cortante.

### Momento flector

El mayor problema de las estructuras preflectadas es resistir el momento provocado por la carga uniformemente repartida y los momentos previos en los extremos. Como en una estructura convencional el punto con mayor momento flector positivo es el centro del vano del pórtico, y a esto se le deben sumar los momentos flectores negativos en los extremos del vano. Esta reacción en los extremos permite que el momento en el centro del vano sea menor que en una estructura convencional, y así que también disminuya la flecha. Si el momento aplicado en los extremos se iguala al momento que provocan las cargas uniformemente repartidas la flecha en el centro del vano será igual a 0.

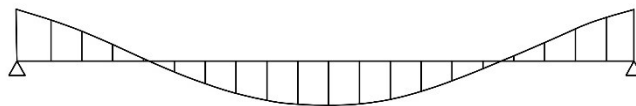


37. Igualación de los momentos positivos (cargas) y negativos (contra flecha) para obtener la flecha igual a 0

Al mismo tiempo permitirá la utilización de una sección con menos área para resistir ese momento, dejando la deformación que permite el CTE. En este caso se mantiene la flecha pero se ahorra en material.

Otra manera de aprovechar la flecha que permite el CTE sería poniendo más carga sobre la estructura, ya que con la sección original la admitiría. Esta manera es la más complicada de realizar o de calcular, ya que las acciones que van a permitir que la deformación se iguale a la horizontal son las cargas variables y estas no son siempre las mismas, así que la estructura sufriría muchos movimientos al largo de su vida.

Como hemos comentado anteriormente, la particularidad de las estructuras preflectadas es que tienen momentos flectores positivos en el centro del vano y momentos flectores negativos en los extremos del vano. Esto provoca que la sección más desfavorable sean los extremos, que tienen momento flector y cortante al mismo tiempo.



38. Momento flector en una estructura preflectada

## Aptitud al servicio

### Desplazamiento vertical

Como se ha comentado anteriormente, las acciones más relevantes en las estructuras preflectadas son las variables, ya que estas determinarán la forma final de los elementos horizontales. Por lo tanto, la consecuencia de estas fuerzas son los desplazamientos verticales.

Existen dos maneras de trabajar con las deformaciones verticales: la primera es calcular la flecha con las cargas permanentes y las cargas variables por separado, y crear la contra flecha con el valor de la flecha de las permanentes. Para cumplir con la normativa del CTE respecto a la flecha admitida, solamente se debe dar que las deformaciones provocadas por las cargas variables sean menores a las que se exponga en el CTE. Esto permite la utilización de un perfil de menor sección, ya que realmente según las restricciones del estado límite de servicios, se deben soportar menos cargas (solamente las variables), siempre que se cumplan las restricciones de los estados límites últimos y no se caiga la estructura.

La segunda forma es contar con las cargas permanentes y variables para realizar los cálculos. En este caso la flecha se utiliza para crear la contra flecha creando una preflexión de forma en la viga previamente a la puesta en carga. La flecha vertical en este caso, cuando actúan todas las cargas, es igual a 0. El problema viene cuando no actúan todas las cargas, cosa que pasa de manera habitual, ya que las cargas variables no actúan siempre a la vez. Para solucionarlo se debe crear algún mecanismo para que provoquen las fuerzas que crean las cargas variables cuando estas no actúan sobre la estructura, como por ejemplo unos tirantes en el centro del vano que hagan que la viga se pueda mantener horizontal.

En el primer caso existen más movimientos en los forjados, dependiendo de si actúan las cargas variables o no, aunque estos estarán permitidos por el CTE. En el segundo caso, mediante el mecanismo de los tirantes, podemos conseguir que el forjado no tenga prácticamente movimientos, ya que cuando las cargas variables no ejerzan fuerza sobre la estructura, los tirantes

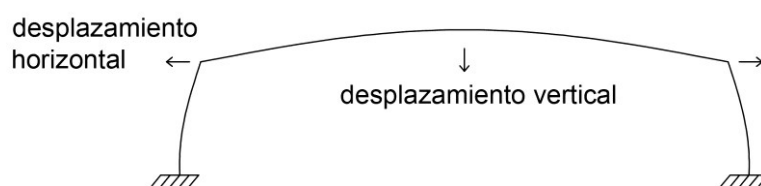
realizarán una fuerza igual y de mismo sentido que permitirá a la viga permanecer con una flecha igual a 0 y mantenerse horizontal.

### Desplazamiento horizontal

Frente a los desplazamientos verticales que van a sufrir los elementos horizontales, el movimiento horizontal se produce, sobretudo, en los elementos verticales. Estos movimientos vienen relacionados por la elongación de la curvatura de la viga preflectada, es decir, cuando la viga recupera su forma horizontal es más larga que cuando está preflectada, en la distancia medida en la proyección sobre el plano. Estos movimientos son del mismo valor y de sentido igual o contrario a los que se producirían cuando una viga convencional es cargada con la carga estimada, dependiendo del momento en el que se encuentre.

Tenemos de esta manera dos posiciones: la posición de la viga preflectada, donde la deformación de los soportes es igual que cuando una viga convencional es cargada, suponiendo que la contra flecha de la preflexión es igual a la flecha calculada en la viga convencional. La segunda posición viene cuando la viga preflectada se carga y pierde su contra flecha, quedando totalmente horizontal. Esta posición se asemeja en forma a una viga convencional sin carga, con los soportes verticales totalmente rectos, con la diferencia de que sí que tiene la carga calculada actuando sobre el vano.

Estos movimientos son importantes controlarlos por 2 razones: la conservación de los elementos no estructurales tales como cerramientos interiores o exteriores; y el confort de los usuarios en el interior. Dicho nivel de confort de las personas respecto a las oscilaciones producidas por fuerzas como el viento o el sismo es algo subjetivo ya que depende de las personas, de la acción que se realice en el interior y diversos factores.



39. Esquema de desplazamientos en una estructura preflectada

### Relación de parámetros

Con lo que, tras el análisis de los parámetros que entran en juego a la hora de plantear el diseño de un edificio que contenga una estructura preflectada, podemos extraer como ideas principales las siguientes:

Fase inicial:



- Características geométricas y resistentes de la sección:
- Cálculo de la flecha y, por tanto, de la contra flecha de la viga

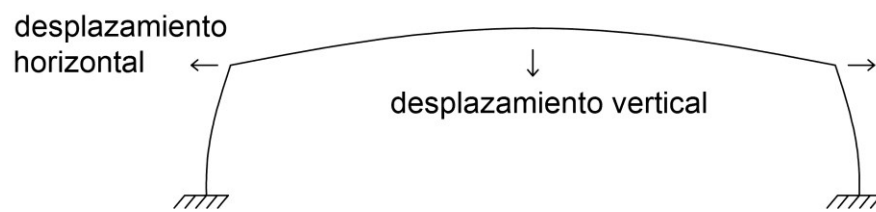
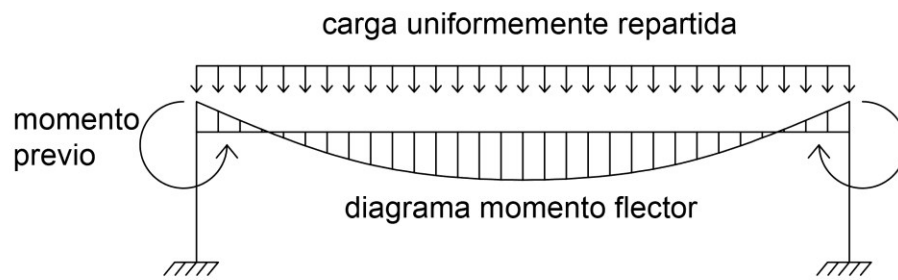
Resistencia y estabilidad:

- Acciones:  
Predominio de las fuerzas verticales sobre las horizontales  
Estructura como pórtico con una deformación previa o con momentos en los extremos del vano
- Esfuerzos:  
Extremos: punto más débil, con más esfuerzos
- Cortante:  
Sumado con el momento flector provoca que el punto más débil sean los extremos de la viga
- Momento flector:  
Se produce por la suma de la carga de las acciones y los momentos previos a la preflexión del perfil

Aptitud al servicio

- Desplazamiento vertical:  
Relación estrecha con la creación de la contra flecha y la horizontalidad del resultado final de la viga
- Desplazamiento horizontal:  
En los extremos de la viga al perder la contra flecha y en los soportes verticales mediante la unión

Donde la relación global de todo sería:



40. Esquema: resumen de los parámetros de diseño

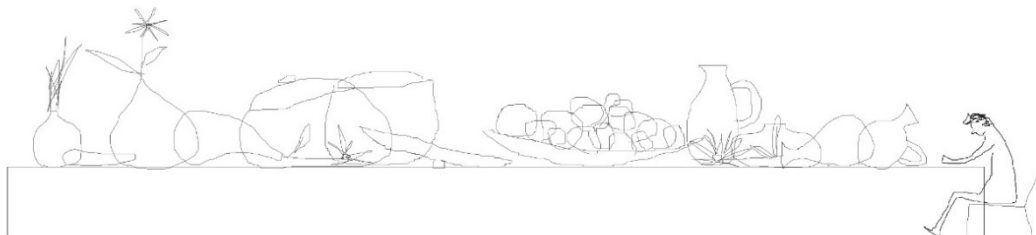
## APROXIMACIÓN AL CÁLCULO: MAGIC TABLE

*"Las complejidades de las fuerzas estructurales y la creación de relaciones espaciales se logran en la escala de los objetos del hogar"* Jeff Kaplon <sup>P4</sup>

Una vez analizado ya qué es una estructura preflectada, que parámetros controlan el diseño de la misma y su recorrido a lo largo de la historia, se procede a un análisis más minucioso de uno de los ejemplos ya nombrados a lo largo del trabajo: el proyecto Magic Table del arquitecto japonés Junya Ishigami, el cual fue su primer diseño en solitario. La elección de este proyecto para su análisis viene dado por tratarse de uno de los proyectos icónicos de la preflexión y, posiblemente, el más mediático.

El proyecto Magic Table fue exhibido el año 2005 en Tokio, Japón. Se trata de un mueble doméstico cuyas características son:

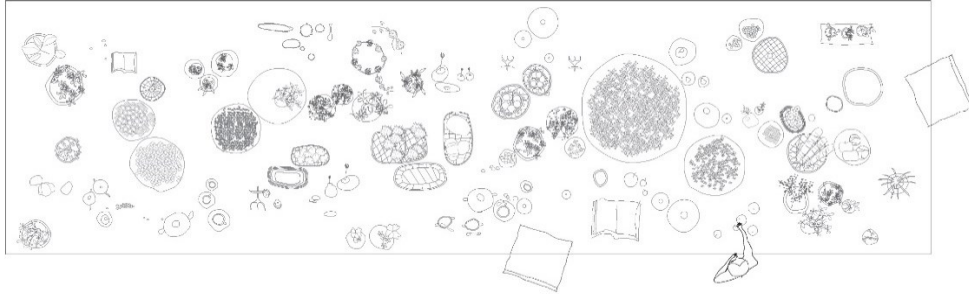
- Tipología arquitectónica: mobiliario
- Año finalización: 2005
- Uso principal: exhibición
- Dimensiones del tablero: 9.5 x 2.6 m x 3 mm de grosor
- Dimensiones de los soportes: 10 x 50 mm x 1.1 m de altura
- Materialidad: aluminio o acero
- Peso: 700 kg



41. Esquema alzado Magic Table

## Programa funcional

La principal función del objeto es expositiva, aunque Ishigami va más allá. Busca trasladar la arquitectura al mobiliario mediante un cambio de escala y así resaltar el verdadero potencial que tiene el pensamiento arquitectónico. Así consigue demostrar que cualquier diseño, como el de una mesa en este caso, puede ser tan complejo y desafiante como el de un edificio, y que el proceso necesita el mismo rigor y detalle que el de un objeto a gran escala.



42. Esquema planta Magic Table

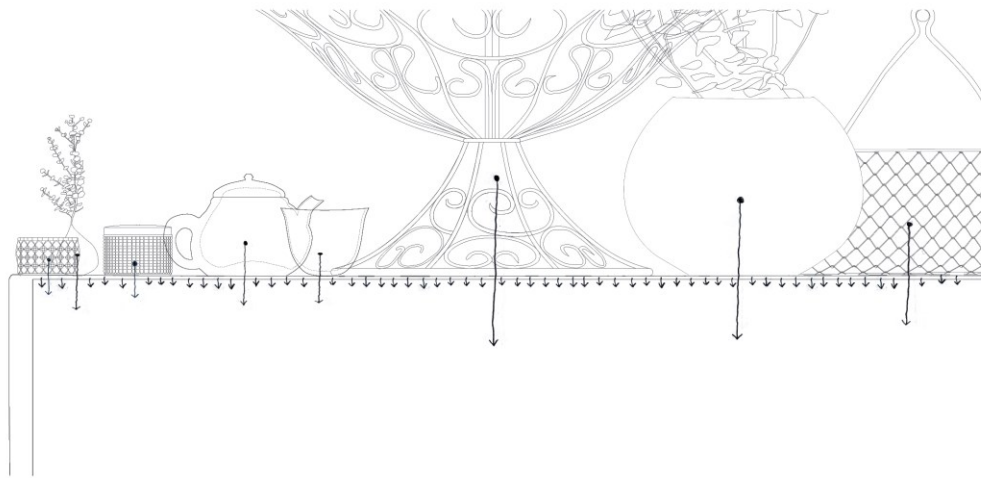
Con el diseño de Magic Table termina trasladando tanto la creación arquitectónica de relaciones espaciales, como visualización de la complejidad de las fuerzas estructurales a la escala de los objetos domésticos. Llega a transformar un proceso totalmente racional, como es el cálculo de una estructura, en un proceso casi irracional, dotando a la mesa de ese carácter mágico al estar flotando con todos los objetos encima y sin flectar, como si se fuese a utilizar como parte de un truco de ilusionismo. <sup>A1 P5</sup>

## Características técnicas

*"Hago esta mesa extremadamente grande como diseñaría una arquitectura pequeña"*

Junya Ishigami <sup>P4</sup>

El diseño de la mesa se basa en una superficie horizontal que está apoyada sobre cuatro finas patas situadas en los extremos de la misma superficie y de 1.10 m de altura. Sobre esta lámina pretensada, es decir, tensada previamente, se distribuyen una serie de objetos de carácter doméstico para configurar un determinado orden gravitatorio. Cualquier alteración sobre los objetos, y consecuentemente, sobre sus pesos, rompería el estado de equilibrio de esta frágil composición armónica.



43. Esquema distribución de fuerzas Magic Table

En cuanto a la construcción del tablero horizontal, se fabrica con una sola lámina de acero (o de aluminio, como se indica en algunos de los dibujos de Ishigami) de 9,5 metros de largo, 2,6 de ancho y 3 milímetros de espesor. Más adelante, se dobla y se riza como si se tratase de una cola de un cerdo, quedando aplicada así la preflexión. Para lograr la planitud final, se desenrosca “in situ” y se colocan encima del tablero numerosos objetos domésticos (platos, tazones, cestas de pan o de frutas, cubiertos, macetas de flores, candelabros...), con sus respectivos pesos calculados, en ubicaciones estratégicas antes de soldar las cuatro patas con el fin de mantener la estabilidad estructural de la pieza.<sup>P2</sup>



44. Construcción tablero Magic Table

Este sistema creado por Ishigami tiene una extremada fragilidad, donde la mínima interacción con el objeto provoca movimientos ondulantes en la fina lámina horizontal. Así pues, hasta con las corrientes que provocaban las personas al pasar al lado, la mesa se movía como si fuese una pequeña marea. Los objetos, afectados por la extraña ingravidez de las mareas, suben y bajan ante nuestros ojos como los restos de un naufragio en un alucinante espejismo acuático (Paul Klee). Este movimiento no hace otra cosa que aumentar la belleza del diseño inmaterial que, al pasar un tiempo, recupera su estado original de quietud.<sup>L8 B1</sup>



45. Magic Table exposición

## Aproximación al cálculo

Analizadas las partes que conforman la estructura de Magic Table, se procede a continuación a entender su funcionamiento. Entrar a una aproximación de cálculo que permita entender cuáles son las ventajas, que es lo que condiciona el diseño...

Para empezar habría que calcular las cargas que ha de soportar la estructura. Para esta aproximación al cálculo la estructura se basará en perfiles tubulares de acero y una lámina de acero como parte horizontal de la mesa. Al tratarse de una estructura destinada a ser expositiva no hace falta situarla en una ciudad con unos parámetros de temperatura y clima concretos para aplicar el Código Técnico de la Edificación.

Por lo tanto, ya que la estructura se encuentra en el interior de un edificio, no se contemplan las cargas de viento ni otras fuerzas horizontales externas.

Seguido a esto, calculadas las cargas, se analizará la estructura asemejando su comportamiento a un pórtico con una deformación previa o con un momento previo, como bien se ha explicado en los apartados anteriores, donde a partir de esa simplificación se extraerán una serie de conclusiones que se utilizarán más adelante.

### **Cargas permanentes**

En este caso las cargas permanentes corresponden al peso propio de la estructura, que al ser una plancha de acero y poniéndola en posición horizontal, como en la imagen final del proyecto, no se soportaría a sí misma y caería, es decir, que sin otro tipo de carga, ni permanente ni variables, la plancha no soportaría ni su propio peso.

En este caso la preflexión es necesaria incluso para soportar las cargas de peso propio, y todavía más necesaria cuando se sitúan los objetos, con un peso considerable, y con unas dimensiones grandes y finas como es el caso de la mesa.

Para una lámina de acero, con una densidad de  $7850 \text{ kg/m}^3$ , de  $9.5 \times 2.6 \text{ m} \times 3 \text{ mm}$  de espesor, su peso será de  $581,69 \text{ kg}$ , es decir,  $5,8 \text{ KN}$ .

### **Cargas variables**

Al ser un proyecto arquitectónico destinado a ser expuesto en un interior, y que no es un edificio como tal, no se aplican las sobrecargas de uso, nieve, térmicas, viento, que se describen en el Código Técnico de la Edificación, así que para poder asemejarlo al máximo a un proyecto de edificación, hemos decidido asignar a los objetos, platos, tazones, cestas de pan o de frutas, cubiertos, macetas de flores, candelabros..., que se colocan encima de la mesa, la función de cargas variables, ya que, sin estas, el cálculo no tendría nada que ver con el de una estructura de un proyecto de un edificio.

Para el cálculo del proyecto Magic Table, Ishigami estima una carga de objetos depositados encima de  $700 \text{ kg}$ , por lo tanto,  $7 \text{ KN}$ .

## **Análisis y conclusiones**

### **Análisis**

Una vez calculadas las cargas a las que estará sometida la estructura, se estudiará en base a su geometría el comportamiento del proyecto. Ver la influencia que tiene la separación que tengan

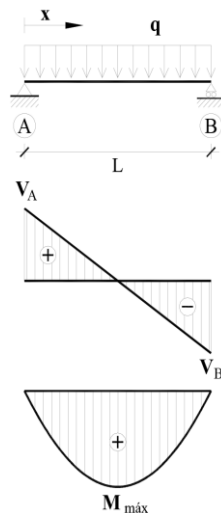
entre sí los soportes, la influencia de la geometría del propio volumen, las dimensiones,... verificando y comprobando muchos de los parámetros anteriormente analizados.

Para ello se simplificará el comportamiento del proyecto al de un pórtico con una deformación previa o un momento flector previo en los extremos, en la cual se apreciará una carga vertical del peso propio de la plancha de acero, como carga permanente, y otra carga vertical perteneciente a las cargas variables de los objetos sobre la mesa.

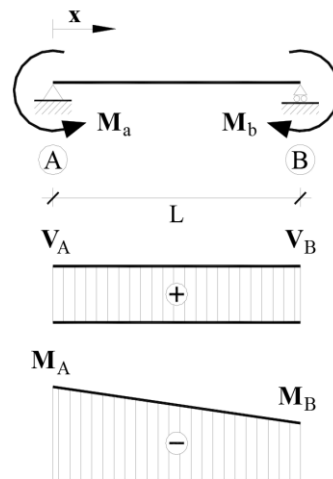
Los valores más importantes a tener en cuenta en este análisis serán:

- Dimensiones del tablero: 9.5 x 2.6 m x 3 mm de espesor
- Carga gravitatoria permanente: 581,69 kg o 5,8 kN.
- Carga variables: 700 kg o 7 kN (según el proyecto de Ishigami)
- Número de soportes: 4 soportes (4 patas de la mesa)

Simplificando a efectos de cálculo, se entenderá la Magic Table como un pórtico con un momento flector en los extremos:

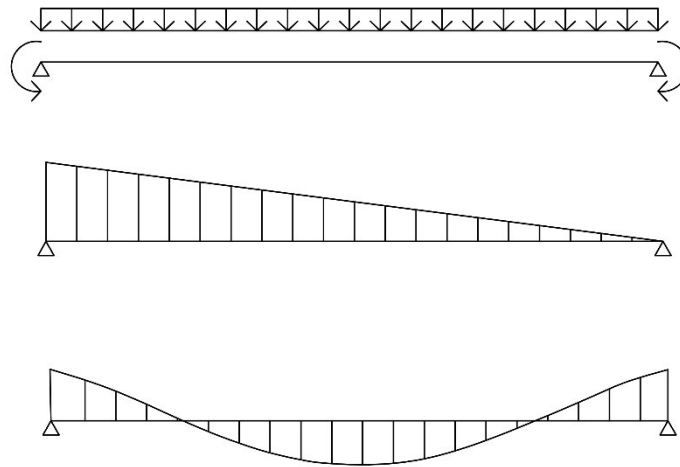


46. Prontuario carga uniforme



47. Prontuario momentos en los extremos





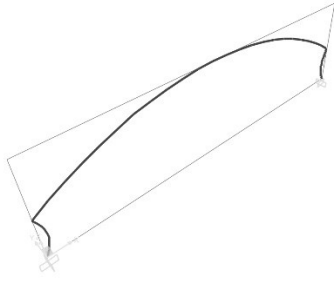
48. Comportamiento cortante y flector estructura preflectada

A efectos de cálculo, la Magic Table no funciona como dos pórticos independientes solamente, sino como una superficie entera.

Para realizar este cálculo de manera más precisa se ha utilizado el programa informático SAP 2000, ya que otros programas no pueden realizar los cálculos de elementos preflectados por no ser un programa de elementos finitos, y así poder realizar diferentes pruebas con restricciones en los nudos, cambios de las cargas, cambios en los soportes..., en la estructura propuesta en el proyecto por Ishigami.

En la totalidad se han realizado 5 prototipos de la Magic Table con el programa SAP2000, donde se han encontrado diferentes problemas dependiendo del modelo a la hora del cálculo del proyecto de manera informática.

En los primeros modelos se intentó realizar un cálculo del modelo como si fuese un pórtico en 2D con una carga uniformemente repartida. Este cálculo no se pudo realizar debido a que la estructura de Magic Table funciona en 3 dimensiones.



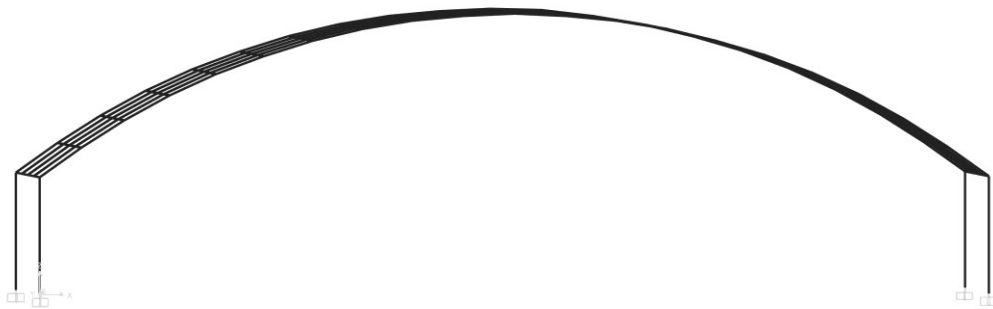
49. Axonometría modelo 0



50. Alzado modelo 0

Los siguientes modelos ya se hicieron con modelados en 3D y con una carga repartida por las 80 superficies en que se divide el tablero. La diferencia entre estos son las restricciones en los nudos y en las patas, experimentando con nudos empotrados, con articulaciones, con las patas horizontales, con las patas inclinadas, con uniones a  $90^\circ$ ... En todos ellos el tablero no cambia, es el mismo.

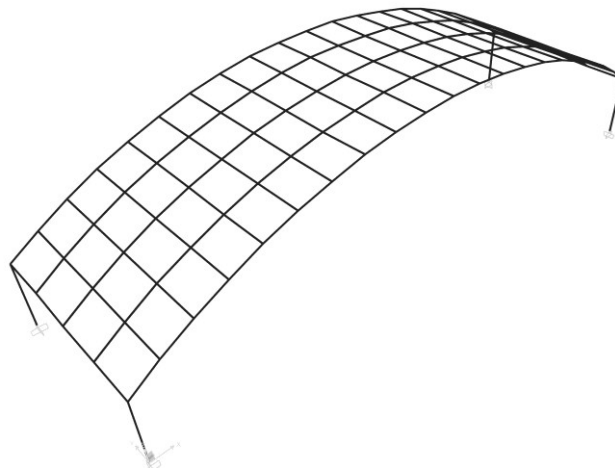
El modelo 1 está compuesto por patas horizontales y empotramientos en la base. En este, al ponerse en carga, se queda relativamente horizontal, a excepción de las esquinas, que se ven afectadas por el movimiento de las patas, que al ser horizontales originalmente, se desplazan hacia el exterior.



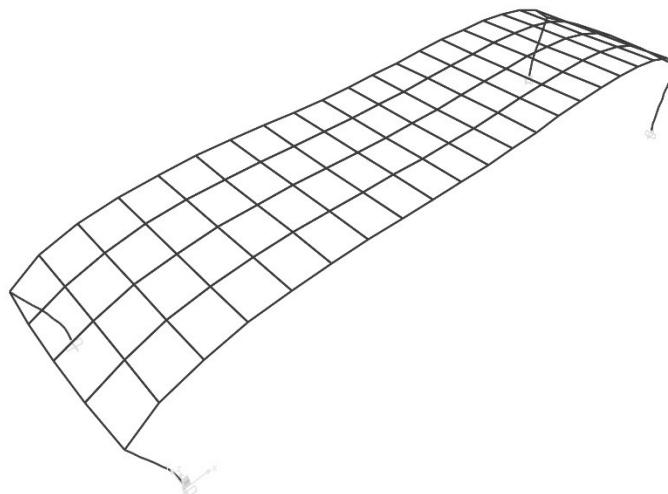
51. Alzado modelo 1



52. Alzado deformado modelo 1

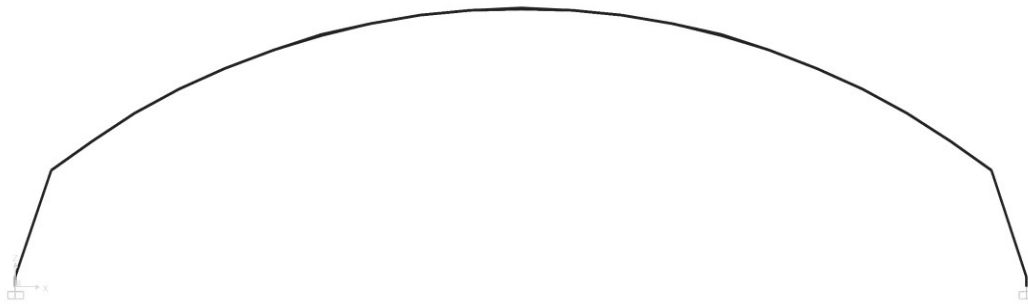


53. Axonometría modelo 1

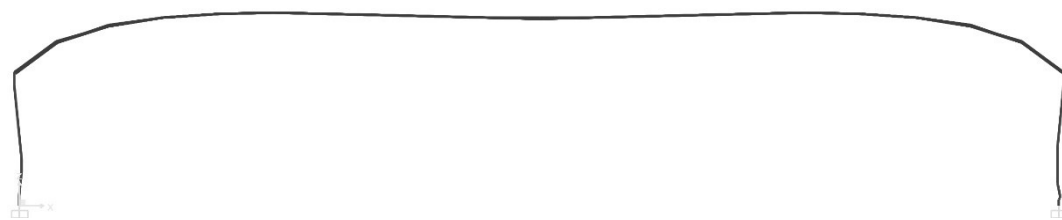


54. Axonometría deformada modelo 1

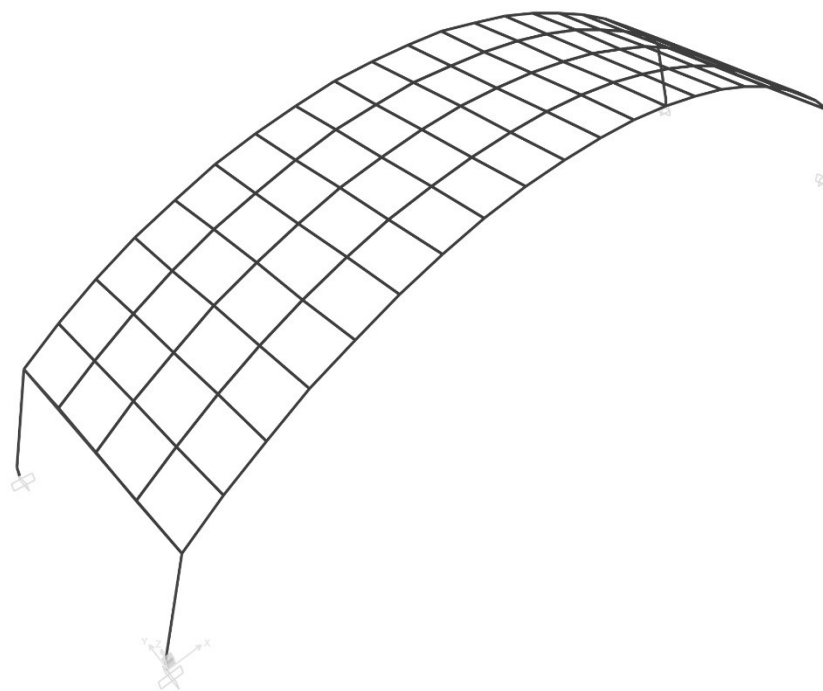
El modelo 2 está creado con las patas inclinadas, para evitar que en la posición final las patas no estén horizontales, y empotradas en su base. Al igual que en el caso anterior, la parte superior queda relativamente horizontal, a excepción de las esquinas. Esta vez las patas si quedan más o menos verticales, pero en la unión de estas con el tablero existe un ángulo mayor a  $90^\circ$ , ya que la restricción de esos nudos no permite que la unión se deforme.



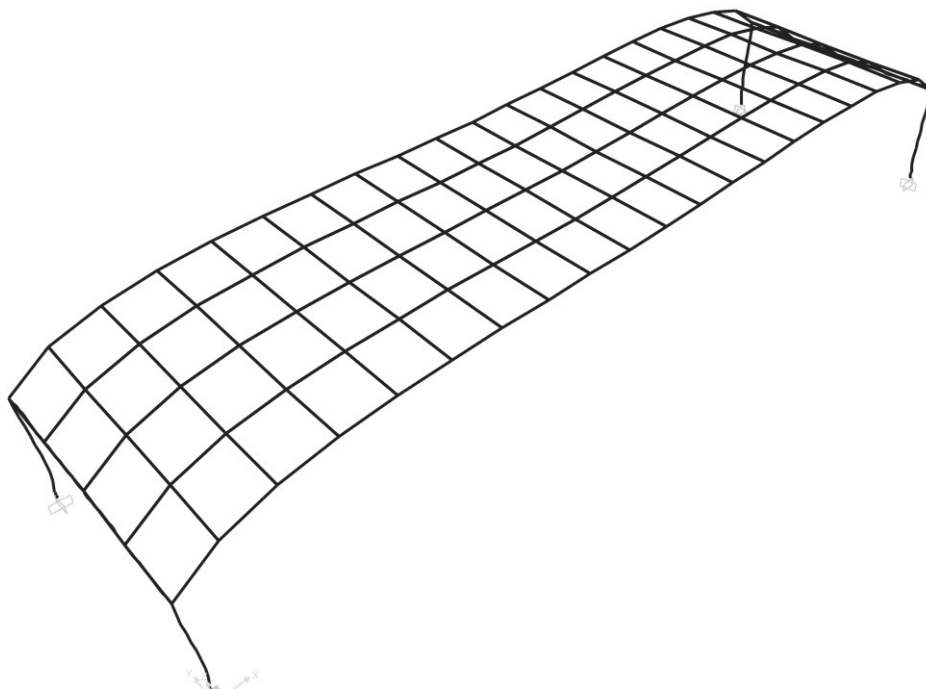
55. Alzado modelo 2



56. Alzado deformado modelo 2

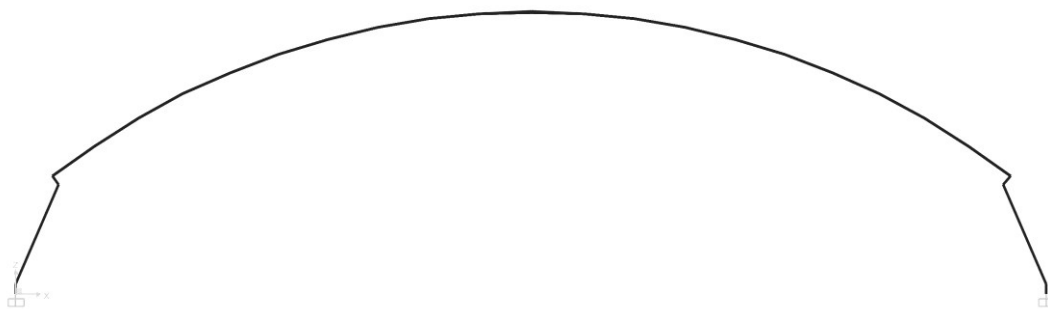


57. Axonometría modelo 2



58. Axonometría deformada modelo 2

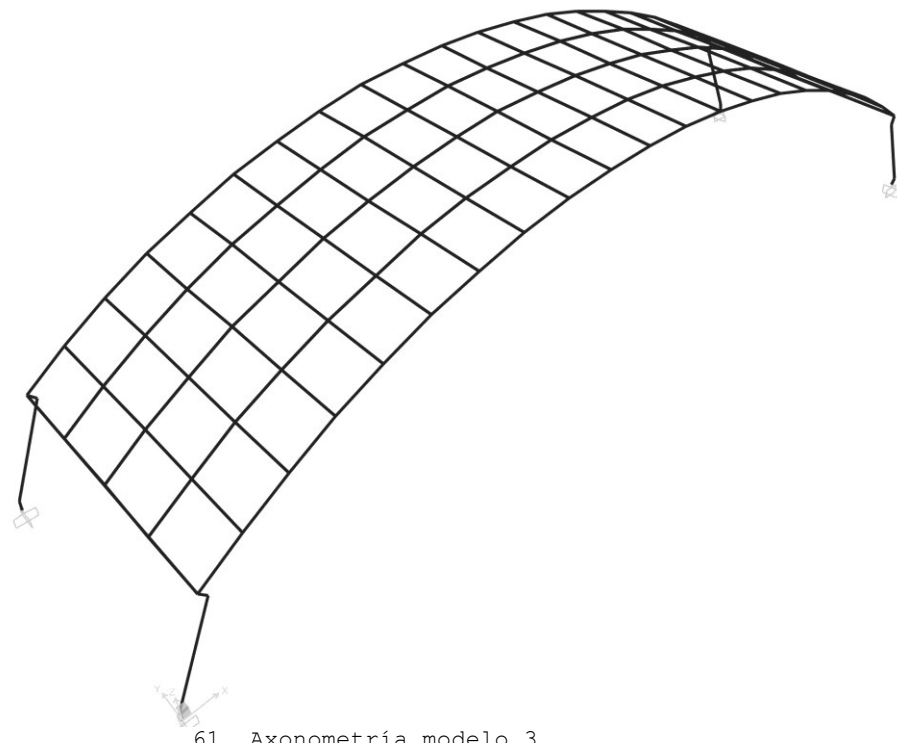
El modelo 3 se realiza, para solventar los problemas antes expuestos, con las partes finales de las patas en un ángulo inicial de  $90^\circ$  y con las mismas restricciones del modelo 2. La mesa sí que queda horizontal y tiene forma de una mesa funcional, aunque las patas tienen un desplazamiento hacia el exterior, parecido al movimiento que se encontró en el modelo 1.



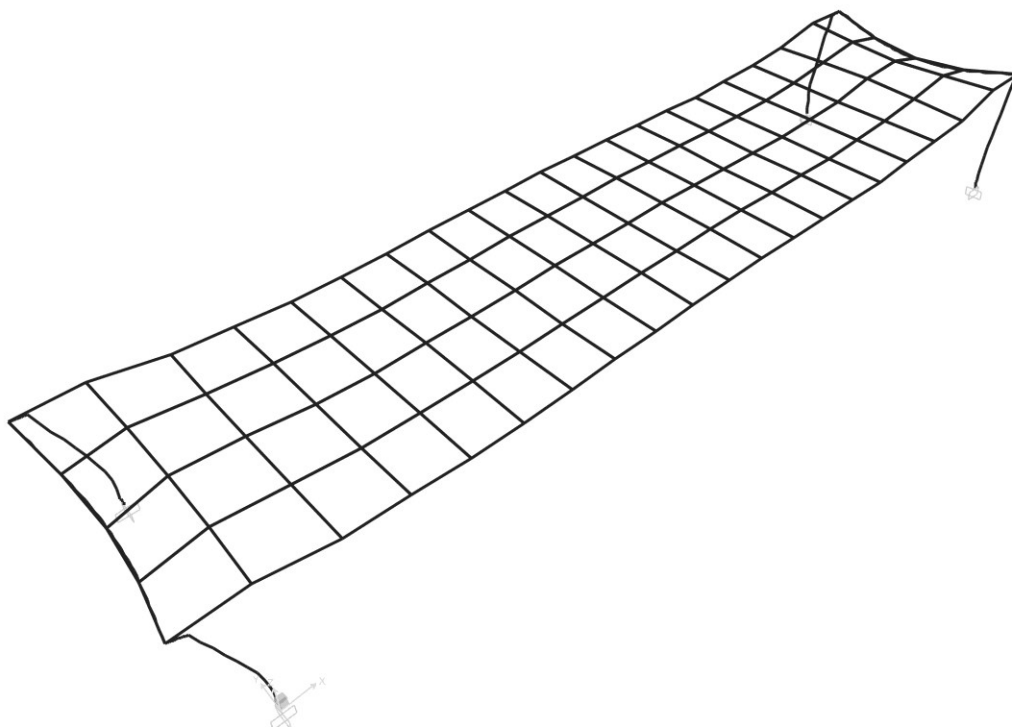
59. Alzado modelo 3



60. Alzado deformado modelo 3

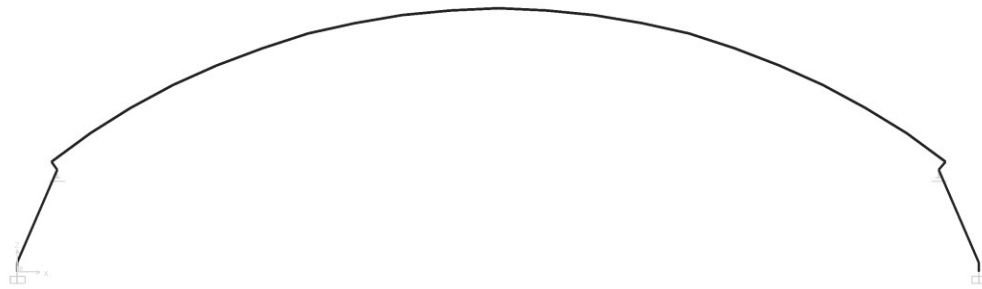


61. Axonometría modelo 3

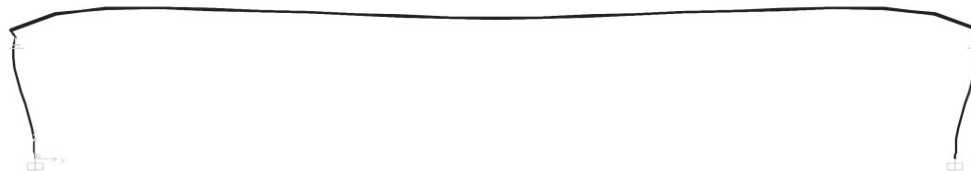


62. Axonometría deformada modelo 3

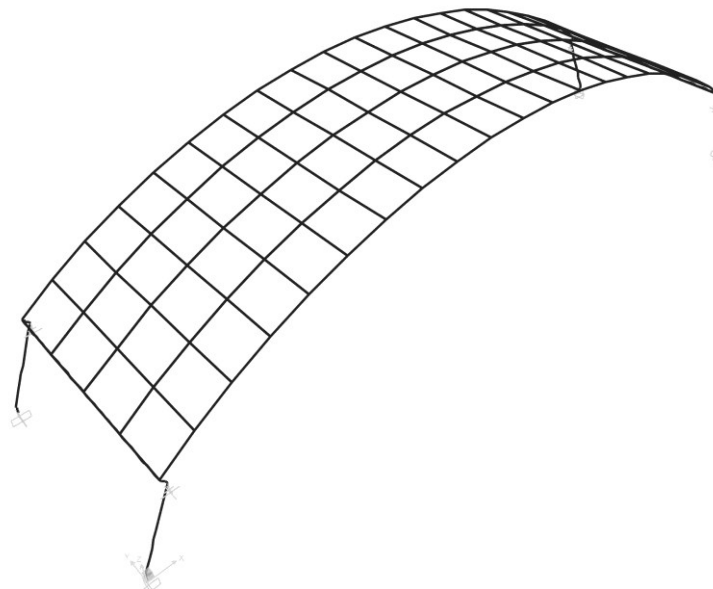
El modelo 4 se reutiliza el modelado del modelo 3, pero cambiando la restricción de la unión de las patas con el tablero, con la finalidad de disminuir la flecha horizontal en las patas y que este movimiento sea más orgánico, y no tan rígido o por partes como en el anterior modelo, para tener una imagen final más parecida a una mesa.



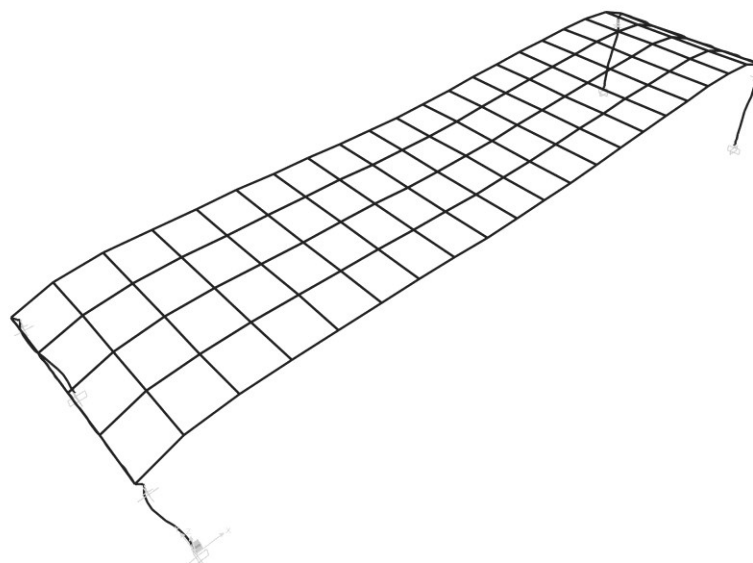
63. Alzado modelo 4



64. Alzado deformado modelo 4



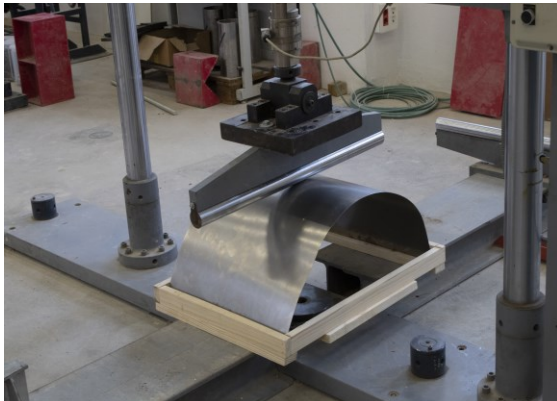
65. Axonometría modelo 4



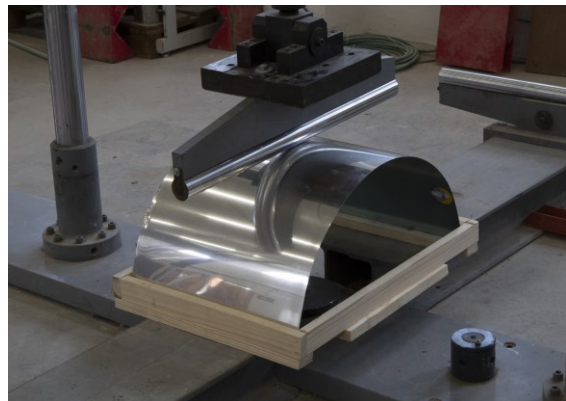
66. Axonometría deformada modelo 4

También se han realizado pruebas con unos modelos a escala en el laboratorio, destinados a la diferenciación entre los materiales con los que proponía Ishigami, y, así, poder tener, también, unos cálculos que no solamente se obtienen de los programas informáticos y poder contrastar estos resultados.

El ensayo trata de colocar la lámina en una base de madera para que, al entrar en carga, se preflecte, y colocar este conjunto en la prensa para poder obtener las gráficas comparativas para el estudio de la estructura.



67. Modelo de acero



68. Modelo de aluminio

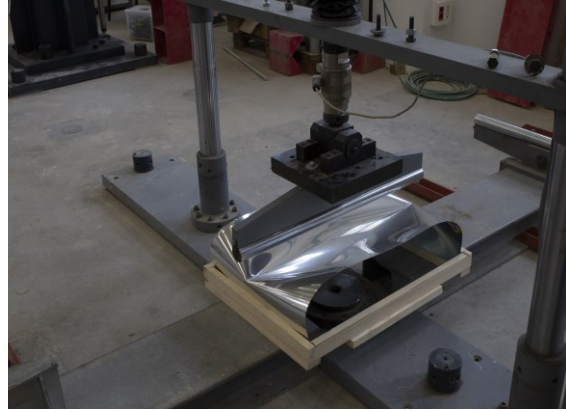
En estos ensayos se han utilizado dos modelos con diferentes materiales, uno hecho con acero y otro con aluminio, para obtener una serie de gráficas de deformación-rendimiento, de deformación-carga,..., y poder comparar los resultados con una estructura sin preflectar y entre ellas, dependiendo del material.

Utilizando unas planchas que por sí solas no se sostenían en posición horizontal (1 x 0.50 m x 0,01 mm) se consigue que, al preflectarlas, soporten unas cargas de 173.15 Kg para la de acero y 49.22 Kg para el aluminio.

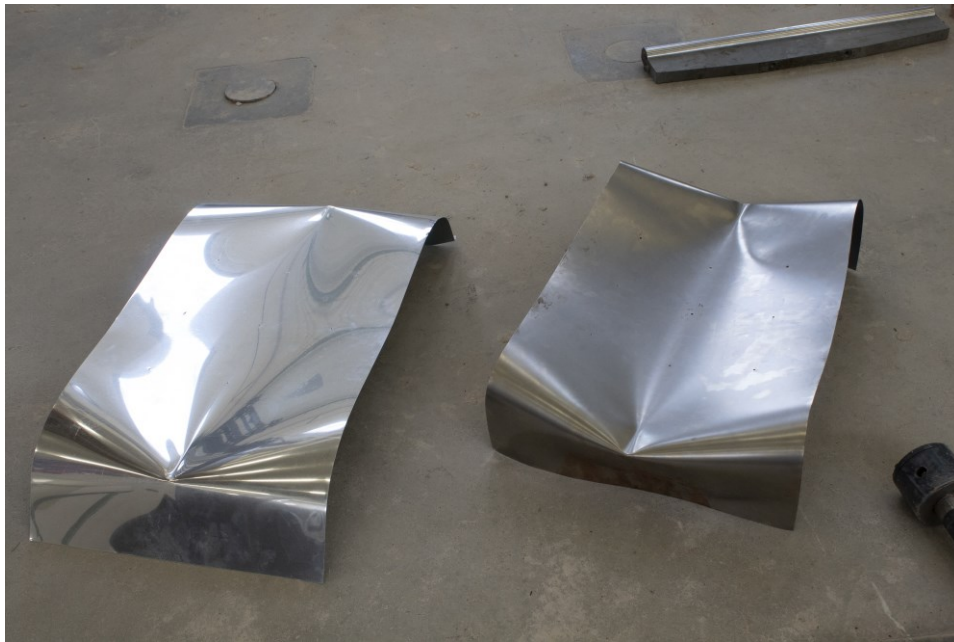




69. Modelo de acero cargado



70. Modelo de aluminio cargado



71. Planchas fuera de la base después de ser cargadas

## Conclusiones

En base a la aproximación al cálculo realizada y a los conocimientos adquiridos a partir tanto de la historia y su evolución como de los parámetros condicionantes en el diseño de estructuras

preflectadas en la edificación, se puede ver que la importancia en el diseño del proyecto Magic Table radica en:

- Material: esta elección viene relacionada con el peso, la resistencia y las dimensiones de la pieza, como en todas las estructuras, sino que sin un material metálico no se va a poder preflectar de manera fácil, como ya se ha explicado anteriormente. En este caso se decide finalmente utilizar acero, que es el mejor material para una construcción en relación a la cantidad de material y a su resistencia.
- Contraflecha: el cálculo de las estructuras preflectadas se basan, sobretodo, en la creación de una contraflecha suficiente que pueda resistir las cargas que se requieren en el proyecto.
- Distribución de cargas: esto es fundamental para el cálculo de la contraflecha, ya que si la distribución de cargas no es distribuida la estructura preflectada no funciona de manera correcta, como por ejemplo con cargas puntuales. También dependiendo del momento flector que se obtenga, el desplazamiento de la estructura será de una manera o de otra, y esto influye directamente en la creación de la contraflecha de la estructura.

## PROYECTO-PROPUESTA

Una vez estudiada la tipología de estructura preflectada, viendo su funcionamiento, su evolución histórica y los parámetros que inciden en el diseño de la misma, se procede al diseño de un edificio perteneciente a este campo. Tomando como datos de partida:

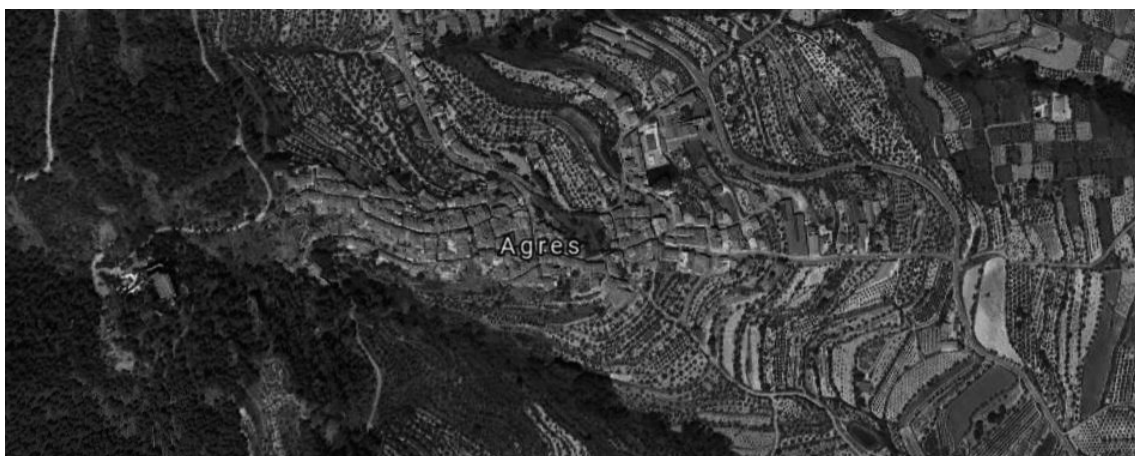
- Programa funcional: función residencial: una construcción de una casa unifamiliar que incluya el desarrollo de la tipología estudiada.
- Estructura: ha de jerarquizar el programa participando con él.
- Criterios de diseño: la estructura preflectada debe quedar totalmente horizontal sin tener un movimiento excesivo como marca el CTE.

Con lo que, en base a esas premisas, se procede a la creación del nuevo edificio residencial ubicado en la comarca del Comtat, cerca de la sierra de Mariola en Agres. Una vivienda unifamiliar que sea totalmente compatible con la tipología estructural.

### Propuesta y emplazamiento

Para comenzar, como bien se ha comentado, el proyecto se ubica en Agres, pueblo el cual pertenece a la Comunidad Valenciana y se encuentra en la provincia de Alicante. Una de las características más relevantes en cuanto a su construcción es el gran uso que se ha dado a las viviendas unifamiliares de una o dos plantas, quedando solo por encima de estas alturas el ayuntamiento y la iglesia con el campanario.

Por esto se considera un buen emplazamiento en el que la construcción propuesta a continuación podría ser posible, y sería una manera de buscar la implementación tecnológica en el ámbito de la edificación en los pueblos pequeños.



72. Mapa aéreo de Agres

## Programa

Como bien se ha comentado en la introducción, a veces la problemática que surge en la construcción de las estructuras preflectadas no viene dada solo por la estructura si no en la compatibilidad que debe tener con el programa que debe albergar en su interior.

La vivienda tendrá una altura para explicar la tipología estructural, aunque se podrían incluir más plantas siempre que no fuese la planta de cubierta. Esta planta se destinará a habitaciones y dormitorios con sus cuartos de baños, cocina y comedor.

El espacio se organizará de tal modo que al acceder a la vivienda se pueda elegir entre el espacio más público (cocina y comedor) y el espacio más privado (dormitorios y habitaciones). En esta última zona encontraríamos 3 tipologías distintas: habitación-estudio, dormitorio individual y dormitorio doble. Todas con vistas hacia el exterior garantizando la entrada de luz natural en cada una de ellas. Al igual que estas instancias los cuartos de baños también tienen conexión con el exterior para permitir una ventilación natural.



73. Planta tipo de la vivienda

En el interior, la estructura será la encargada de jerarquizar las diferentes zonas: tránsito, dormitorio, habitación-estudio y baños. Incorporando los soportes y tensores a la tabiquería para que estos queden ocultos.

## Análisis estructural

Vista la organización del programa en planta de esta vivienda unifamiliar en Agres, se procede al análisis de su estructura y el modo en que se aprovechan los conocimientos adquiridos y explicados tanto en el ejemplo de la Magic Table como desde la visión general con la evolución histórica y los parámetros y condicionantes.

Con lo que, la estructura será la encargada de formar el espacio. Entrará en sintonía con el programa y lo articulará de tal modo que el edificio se describa por sí solo.

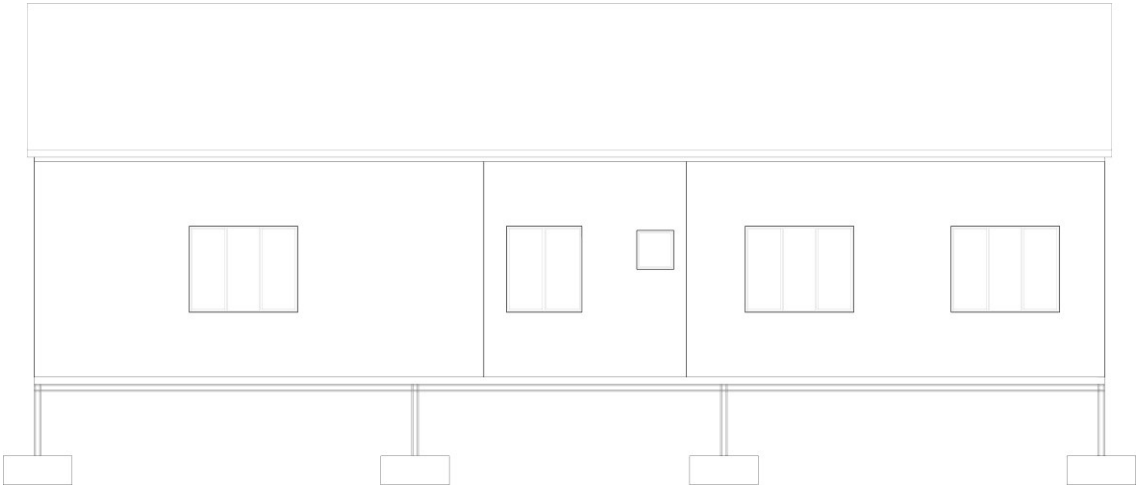
Para ello se procede a presentar las vistas generales donde se combine el uso con la estructura, ver la relación para así poder desmenuzar los elementos principales que la forman. Se va a añadir una explicación tanto técnica de la estructura como desde el punto de vista de proyectos que tenga la creación de espacios.



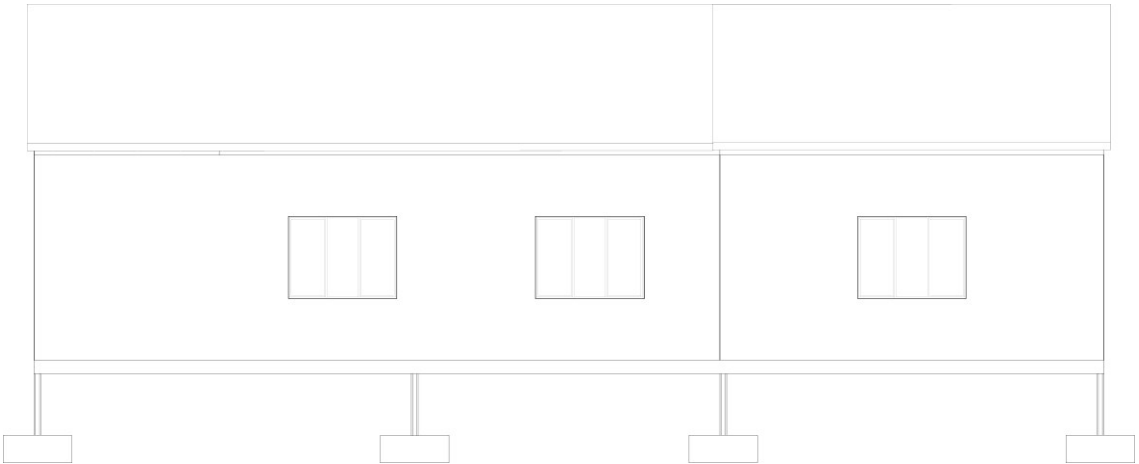
74. Alzado Norte



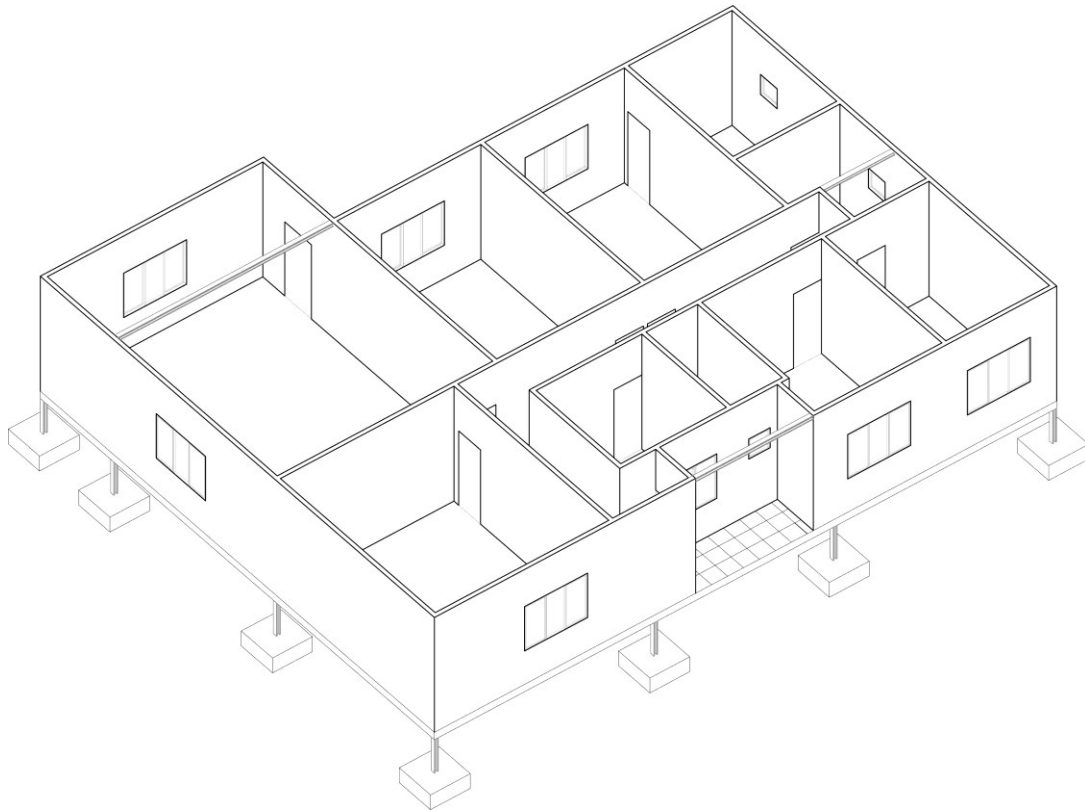
75. Alzado Sur



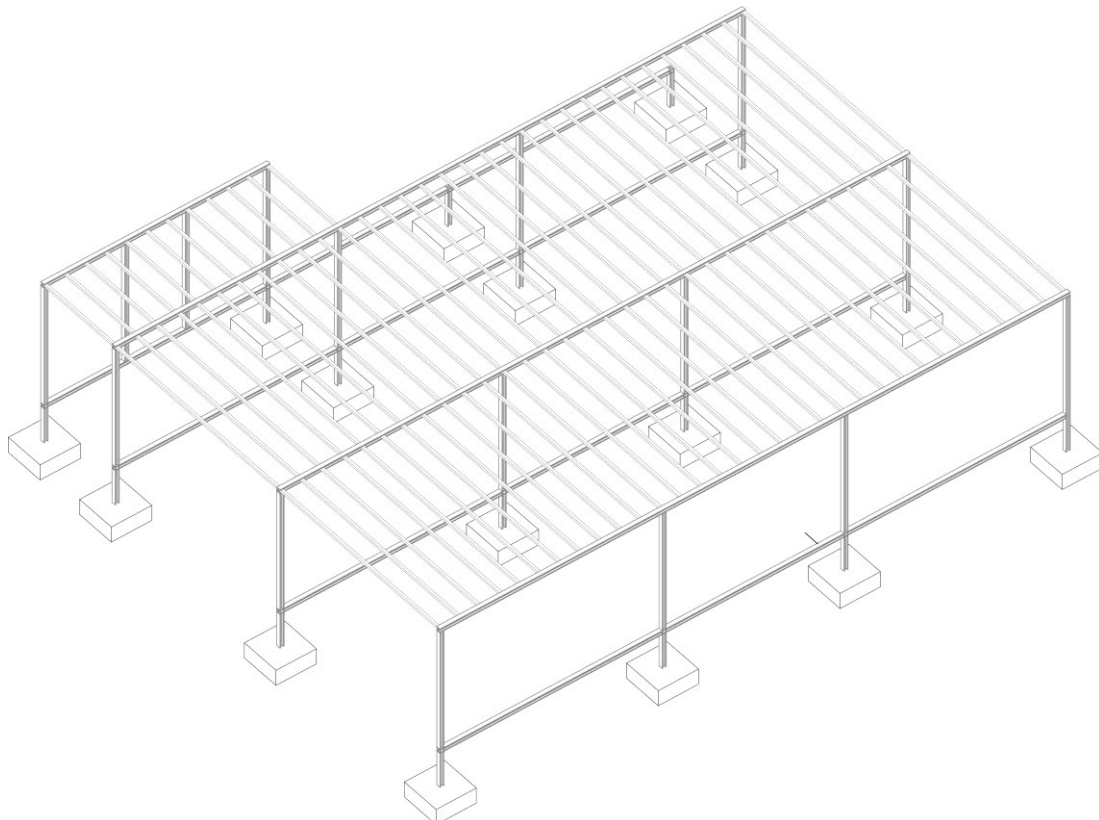
76. Alzado Este



77. Alzado Oeste



78. Axonometría vivienda



79. Axonometría estructural

Los datos que definen al edificio de forma técnica serían:

- Tipología arquitectónica: vivienda unifamiliar
- Uso principal: residencial
- Altura: 4,20 m
- Número de plantas: 1
- Plantas bajo rasante: 0
- Superficie en planta: 196,56 m<sup>2</sup>
- Geometría planta: rectangular
- Estructura: perfiles de acero, preflectados y sin preflectar, y hormigón armado

Los elementos principales que conforman la estructura del proyecto son:

- Forjados convencionales a excepción del último forjado (forjado de cubierta) que será preflectado
- Soportes: elementos metálicos
- Vigas preflectadas en el último forjado

### **Forjados convencionales**

Los forjados de la vivienda, ya sea entre plantas en caso de tener o el forjado sanitario, deben ser convencionales, es decir, sin tener preflexión. Esto es debido a que las cargas variables y la sobrecarga de uso que se produce en una vivienda no permitirían a una estructura preflectada de todo un forjado mantener una estabilidad continua, y se producirían movimientos en este cuando estuviesen los usuarios en su interior. Este hecho produciría una sensación de incomodidad y de malestar que para nada es la deseada, así que se descarta la idea.

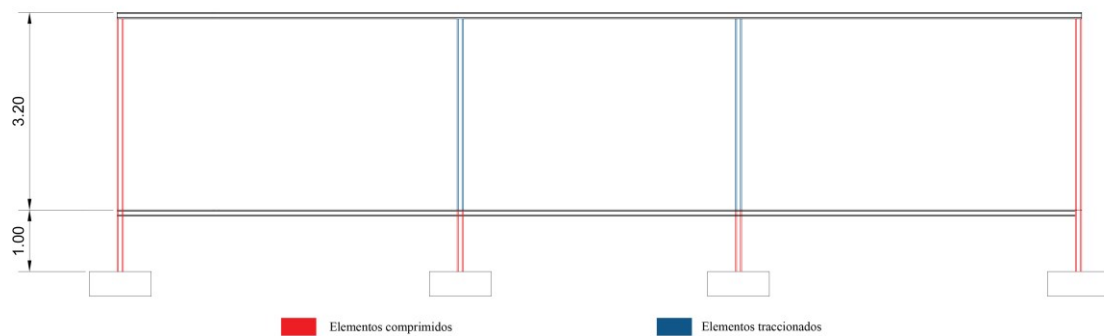
### **Soportes**

Los soportes que se deben utilizar son de material metálico. Esto se debe principalmente a la unión de estos con los forjados. Como se ha comentado en los capítulos anteriores, las estructuras preflectadas solo se pueden realizar con materiales metálicos, a no ser que se realice una preflexión de forma y se apoye en los soportes. Entonces para realizar las uniones de la estructura de manera fácil y con las restricciones deseadas, los soportes deben ser metálicos.

Otra razón por la que se deben utilizar soportes metálicos es que hay algunos de ellos que trabajan a compresión y hay otros que trabajan a tracción. Para resolver esto, uno de los materiales que mejor responde a tracción y a compresión son los metálicos. Además los perfiles metálicos pueden soportar las solicitaciones de la estructura con menos sección. Esta consideración se realiza sin



ningún cálculo de perfiles, pero se sabe que no se van a utilizar el mismo tipo de perfil para los pilares comprimidos que para los pilares traccionados.



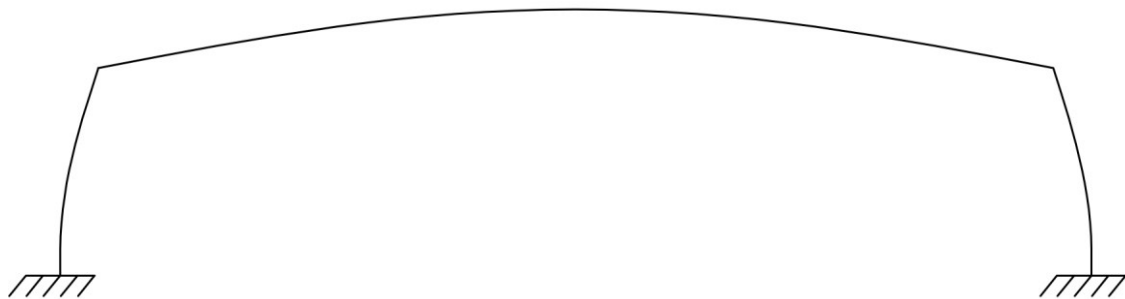
80. Esquema trabajo de los soportes

### Cubierta preflectada

El último forjado, es decir, la cubierta, se hará con una estructura con vigas preflectadas. En este caso, las solicitaciones de sobrecargas, uso y cargas variables permiten la utilización de este tipo de estructuras, ya que no va a ser utilizada por los usuarios de manera continuada.

La cubierta se desarrollará de la siguiente manera: primero se realizará un cálculo de todas las cargas que intervienen en la estructura; luego se calculará la estructura como un pórtico convencional con la carga ya conocida, lógicamente el pórtico tendrá las medidas que se le haya dado a las viviendas; después se dimensiona el pórtico para los estados límites últimos (ELU) y los estados límites de servicio (ELS).

Con estos resultados obtendremos la flecha que tiene el pórtico, y por lo tanto, como se ha descrito en capítulos anteriores, la contra flecha necesaria para crear la estructura preflectada y que esta mantenga su resistencia y sus demás propiedades.



81. Estructura de cubierta preflectada

Hasta ahora hemos conseguido que la cubierta resista todas las cargas que se han introducido en el cálculo y que la estructura se quede con una flecha igual a 0, la viga se quedaría totalmente horizontal cuando se aplicasen las cargas.



82. Estructura de cubierta con los soportes traccionados

La otra situación viene dada cuando no todas las cargas estimadas existen en ese preciso momento, como la sobrecarga de nieve por ejemplo, sobre la estructura. Ahora es cuando entran en juego los pilares que trabajan a tracción. Estos pilares, que se colocarán de manera simétrica en las partes centrales del vano, serán los encargados de mantener la tensión en la viga cuando algunas de las cargas no generen reacciones. Así nos quedan una serie de pilares, donde, de manera general, los perimetrales trabajarán a compresión, mientras que los centrales trabajarán a tracción, y una serie de vigas metálicas preflectadas que se apoyarán en los pilares perimetrales (comprimidos) y serán estiradas por los pilares centrales (traccionados) con la finalidad de recuperar la horizontalidad.

## Aproximación al cálculo

A la hora de mostrar los cálculos de manera manual, se van a realizar algunas simplificaciones para que estos no sean excesivamente complejos y no se pueda comprender la esencia del cálculo de las estructuras preflectadas.

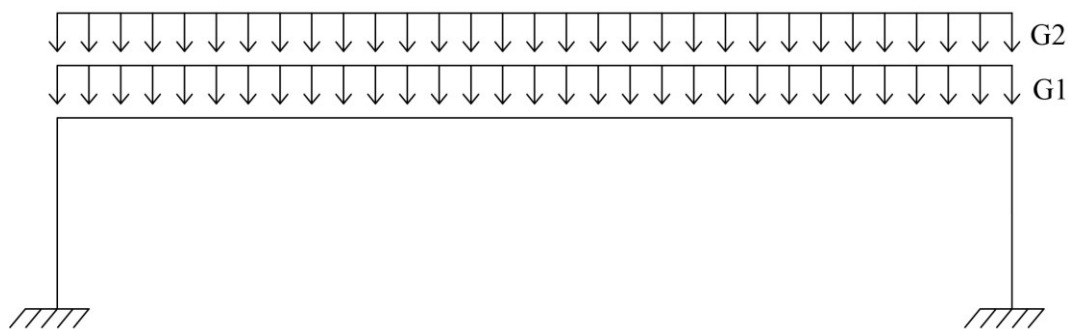
Para realizar el cálculo de esta estructura se van a utilizar dos métodos. El primero será dimensionar el pórtico sin los pilares intermedios para conocer que viga se debería utilizar. El segundo será suponer un tipo de viga, que sea más normal su utilización en la construcción, y calcular la flecha que tendría con la suposición de cargas. A partir de aquí, esta sería la contraflecha que se debería aplicar a la viga previamente elegida.

Como en todo tipo de estructuras, empezaremos por estimar las cargas que se deben soportar. La aproximación se basará en perfiles IPE y HEB en vigas y pilares, aunque no estén dentro de los perfiles comerciales. En todo momento se deberá aplicar el Código Técnico de la Edificación, ya que en este caso trabajamos con una construcción que se debe ser lo más real posible para que se pudiese construir.

### Cargas permanentes

Las cargas permanentes corresponden al peso propio del forjado y al peso de la cubierta, que según el CTE tiene un peso de  $4 \text{ KN/m}^2$  y  $3 \text{ KN/m}^2$ , respectivamente. Con una distancia entre los pórticos de  $5 \text{ m}$ , a nivel de cálculo, estas cargas se convierten en una carga uniformemente distribuida de  $35 \text{ KN/m}$  ( $G_1 = 35 \text{ KN/m}$ ).

También se deberán incluir las cargas de fachada. En este caso se supone una altura de  $1 \text{ m}$  de fachada sobre el forjado de cubierta. La fachada está formada por dos líneas ladrillo, aislante, aplacado y enfoscado. Se cogerán como cargas las establecidas por el CTE: ladrillo LH 9cm,  $1 \text{ KN/m}^2$ ; aislante,  $1 \text{ KN/m}^2$ ; aplacado de  $2 \text{ cm}$ ,  $0,5 \text{ KN/m}^2$ ; enfoscado,  $0,3 \text{ KN/m}^2$ . La carga de fachada será un total de  $3,8 \text{ KN/m}$  ( $G_2 = 3,8 \text{ KN/m}$ ).



83. Esquema cargas permanentes

La carga de tabiquería se dará en el forjado sanitario pero no en el forjado de cubierta.

### Cargas variables

Las sobrecargas, ya sean de uso, de nieve o de viento, son las que se engloban dentro de las cargas variables. Como en el caso de la tabiquería, las sobrecargas de uso de vivienda afectan al forjado sanitario. La sobrecarga de una cubierta accesible únicamente para su conservación con una inclinación inferior al  $20^\circ$  es de  $1 \text{ KN/m}^2$ , en su proyección horizontal ( $Q_1 = 5 \text{ KN/m}$ ).

La sobrecarga de viento se basa en una ecuación,  $q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p$ .

En el anejo D de DBSE-AE del CTE se puede obtener el valor de  $q_b$  según el emplazamiento geográfico de la obra. En este caso nos encontramos en una zona B donde el valor de la presión dinámica del viento es de  $0,45 \text{ KN/m}^2$ .

El grado de aspereza del entorno es III al tratarse de una zona rural con obstáculos aislados, y la altura es de  $4 \text{ m}$ , por tanto el valor de  $C_e$  es  $1,75$ .

La esbeltez se obtiene con la relación de la altura y la base,  $H/B = 6/12,6 = 0,47$ . Así el valor de  $C_p$  será 0,7 y el  $C_s$  de -0,4.

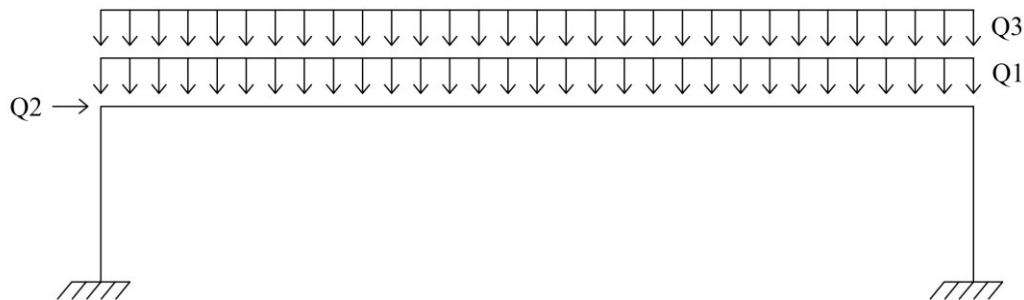
Así el valor de la acción del viento será:

$$q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p = 0,45 \cdot 1,75 \cdot 0,7 = 0,55125 \text{ KN/m}^2$$

Para la misma distancia entre los pórticos de 5 m y una altura de 1,5 m, la carga de viento será de 4,13 KN ( $Q_2 = 4,13 \text{ KN}$ ).

La sobrecarga de nieve depende del clima del lugar, del tipo de precipitación, del relieve del entorno, de la forma del edificio o de la cubierta... En nuestro caso utilizaremos un mapa para determinar el valor de la carga, dependiendo de la zona y de la altitud de la localización del proyecto. Para la localización de Agres, en la zona 5, con una altitud de 700 m, el valor de la sobrecarga de nieve será de 0,6 KN/m<sup>2</sup>.

Como en los casos anteriores, el valor para el cálculo será de 3 KN/m para una distancia de 5 m entre los pórticos ( $Q_3 = 3 \text{ KN/m}$ ).



84. Esquema cargas variables

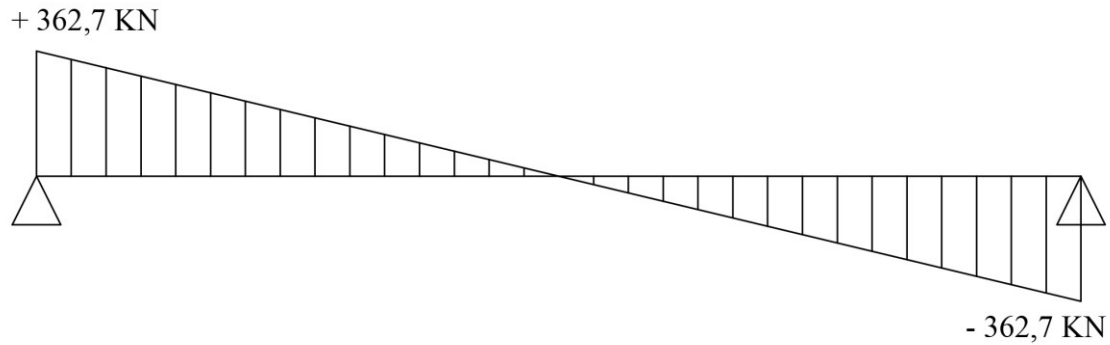
## Análisis

Una vez se han realizado los esquemas de las cargas que actúan sobre la estructura, se pasa al cálculo según los métodos antes expuestos.

En primer lugar obtendremos las reacciones, los momentos flectores y las hipótesis de cargas con las que vamos a trabajar. En el caso de estas últimas, van a utilizarse todas las cargas previamente explicadas con los factores de mayoración según sean cargas permanentes o variables. Los factores de mayoración de los coeficientes “ $\gamma$ ” serán 1,35 para las cargas permanentes y 1,5 para las cargas variables. En el caso de trabajar en las combinaciones de Estados Límites de Servicio, se supone un valor del coeficiente “ $\gamma$ ” y del coeficiente “ $\psi$ ” igual a 1.

El valor del cortante, sin mayorar, en el vano será:

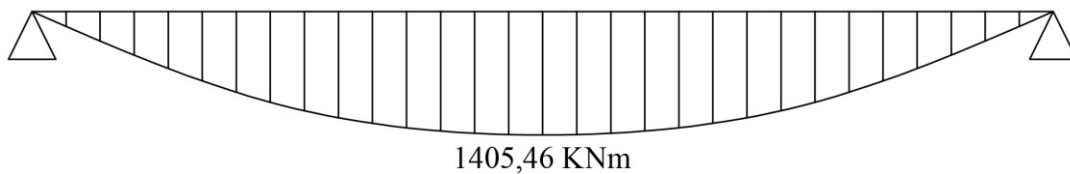
$$V = \frac{q \cdot L}{2} = \frac{46,8 \cdot 15,5}{2} = 362,7 \text{ KN}$$



85. Esquema de cortantes sin mayorar

El valor del momento máximo, que se dará en el centro del vano, será:

$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{46,8 \cdot 15,5^2}{8} = 1405,46 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



86. Esquema de momento flector sin mayorar

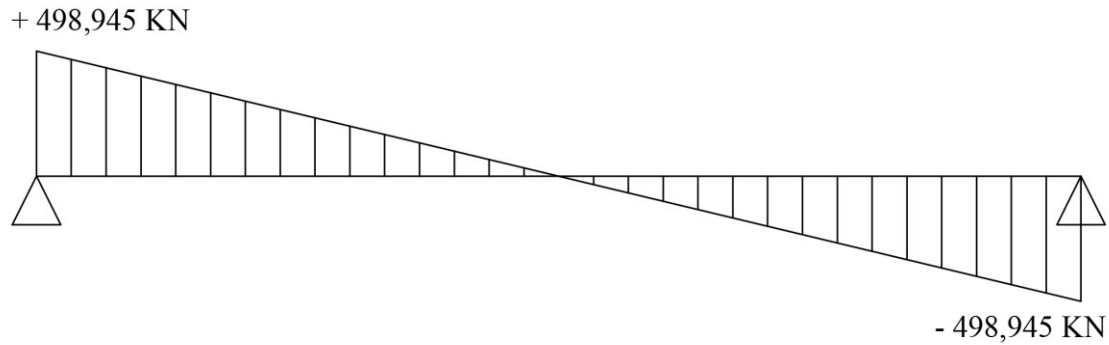
Para los cálculos de Estados Límites Últimos se considera una carga de 64,38 kN/m obtenido a partir de:

$$Q = 1,35 \cdot 38,8 + 1,5 \cdot 8 = 64,38 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

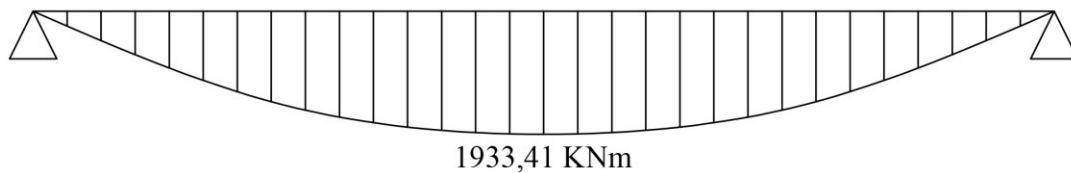
Utilizando las mismas ecuaciones obtenemos los siguientes valores de cortante y de momento flector máximo:

$$V = \frac{q \cdot L}{2} = \frac{64,38 \cdot 15,5}{2} = 498,945 \text{ kN}$$

$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{64,38 \cdot 15,5^2}{8} = 1933,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



87. Esquema de cortantes mayorados



88. Esquema de momento flector mayorado

Para el cálculo de E.L.U. se busca un perfil comercial apto para estas solicitaciones, entonces:

$$W_{ply} \geq \frac{M_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{1933,41 \cdot 10^6}{275/1,05} = 7382,1109$$

Este valor es 3 veces superior al de un IPE 550, que es uno de los perfiles más grandes de la serie IPE a nivel comercial.

Para el cálculo de E.L.S. se realiza la misma búsqueda para las solicitaciones, suponiendo una flecha de  $L/400$ :

$$f = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}; I = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot f};$$

$$I = \frac{5 \cdot 46,8 \cdot 15500^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 15500/400} = 432235,49 \cdot 10^4 \text{ cm}^4$$

El valor obtenido es 10 veces el valor del perfil comercial IPE 500.

Para los soportes se puede obtener el perfil mediante la siguiente ecuación:

$$W_{ply} \geq \frac{M_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{4,13 \cdot 10^3 \cdot 3,2 \cdot 10^3}{275/1,05} = 50,461 \text{ cm}^3$$

El valor  $W_{ply}$  de un perfil HEB 100 es  $104,2 \text{ cm}^3$ , por tanto, este perfil sería suficiente para soportar las solicitaciones.

Al no ser posible encontrar un perfil comercial suficiente que soporte las cargas establecidas, se va a calcular según el segundo método explicado en el apartado anterior.

Escogiendo un perfil IPE 400, que a pesar de ser algo grande es más común su utilización en la edificación de viviendas, se pasa a calcular la flecha que se obtendría con la misma fórmula que se ha utilizado antes:

$$f = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot 46,8 \cdot 15500^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 23130 \cdot 10^4} = 724,13 \text{ mm}$$

Por lo tanto, si se crea una contraflecha de  $724,13 \text{ mm}$  en un perfil IPE 400, al verse cargado por las hipótesis consideradas, se deformará hasta quedar totalmente horizontal.

El cálculo de los soportes se realizaría de la misma forma que antes, dando como resultado un perfil HEB 100.

## Discusión

El inicio de esta propuesta se basaba en poder recoger todos los parámetros clave de diseño buscando el modelo icónico de estructura preflectada. Para la construcción de esta vivienda se ha calculado la viga, con la contraflecha que es necesaria para que aguante las cargas, pero este cálculo se ha realizado con todas las cargas al 100%, algo que no va a ocurrir nunca en una edificación real.

Para evitar el movimiento vertical del forjado debido a su contraflecha se estima poner dos pilares en el centro del vano de manera que absorban los movimientos que se puedan producir. Así, el forjado se mantendrá siempre en horizontal, aunque no estén actuando todas las cargas, ya que los pilares centrales que estarán traccionados simularán las cargas que no tengan efecto en ese preciso momento.

Con los resultados obtenidos se puede hacer una lectura de los beneficios que tienen las estructuras mediante una comparación.

Como se ha mostrado en el último cálculo, las estructuras preflectadas brindan un mejor comportamiento bajo cargas de servicio. Con un perfil mucho menor, ya que el primer cálculo superaba el IPE 600, que es el último perfil comercial de la serie, se ha podido obtener un pórtico que soporte las cargas.

Aquí se pasa al segundo beneficio visible en las estructuras preflectadas, los elementos preflectados logran ser más eficientes y esbeltos utilizando menos material que otros procesos constructivos y, a su vez, se consigue disminuir los costos de la obra, siempre que se usan adecuadamente y en los elementos que corresponde.

*"La Arquitectura no son cuatro paredes y un tejado sino el espacio y el espíritu que se genera dentro"*Lao Tsé <sup>B3</sup>



## CONCLUSIONES

Tras realizar el trabajo se puede decir que la edificación con estructuras preflectadas es una tipología que viene definida por una serie de parámetros, los cuales se basan en una fase de diseño, muy importante en este tipo de estructuras, en aspectos relacionados con la resistencia y estabilidad y por último la aptitud al servicio.

Se trata de un concepto aún por desarrollar que ha evolucionado poco debido a su novedad, pero irá evolucionando con el avance de las tecnologías y los materiales.

Ya desde la antigüedad se desarrollaron objetos convencionales como la sierra de arco, la rueda de bicicleta o el barril de madera donde se intuía el funcionamiento de esta tipología estructural pero no se sabía calcular. Al igual se desarrollaron edificaciones en las que no se tenían muchos recursos y se utilizaron este tipo de estructuras, aunque de igual manera no se tenía el conocimiento para calcularlas.

Como bien se ha comentado durante el trabajo, las cargas más importantes para las estructuras preflectadas son las uniformemente distribuidas, ya que de otra manera este tipo de estructuras no funcionan de manera correcta, pero el factor más determinante es la contraflecha, que es la deformación que tiene un elemento al ser preflectado y a partir de la cual se pueden obtener muchos beneficios de cara a resistir las cargas a las que se somete la edificación y evitar un incumplimiento de la normativa vigente a efectos de servicio, en el caso de España el Código Técnico de la Edificación.

Los cálculos realizados, tanto a nivel informático como a nivel manual, muestran los beneficios que tiene trabajar con estructuras preflectadas como puede ser brindar un mejor comportamiento bajo cargas de servicio gracias a la creación de una contraflecha que permita una mayor deformación, los elementos preflectados logran ser eficientes y esbeltos utilizando menos material que otros procesos constructivos, y, consecuentemente y siempre que se utilice en los elementos correspondientes y de una manera adecuada, la preflexión provocará una disminución en los costos de la obra.

A estos aspectos también se le deben sumar otros factores que, a la hora de decantarse por una estructura preflectada o no, se deben tener en cuenta. Si las piezas preflectadas son para situaciones muy puntuales y que no tengan una producción en serie, al ser industrializado, se requiere de una inversión inicial para la creación de estas. El diseño de estos elementos estructurales es más complejo y especializado y, por lo tanto, requiere de más tiempo y más cálculos para su utilización. A su vez, se necesitan contar con operarios especializados para la construcción de los elementos, ya sean pretensados, postensados o preflectados. Además, si no se

emplean adecuadamente y en los elementos que corresponde, se puede incrementar los costos de la obra.

A modo de conclusión, la edificación con estructuras preflectadas es un campo estructural que ha ido evolucionando poco a poco, pero que aún se puede explotar de mano de los avances tecnológicos. Esto supondrá una mejora de la eficiencia y un ahorro de material en el sector de la construcción. Se ha ejemplificado con diversos proyectos y entrando más profundamente en el proyecto Magic Table. Con lo que se plantea concluir el trabajo de estructuras preflectadas con la siguiente cita:

*"A medida que desaparecen los viejos edificios, otros totalmente nuevos ocupan su lugar, con un claro patrón del progreso: los palacios empresariales reemplazan a los palacios privados, la aristocracia del jabón sustituye a la aristocracia social: flamantes torres con estructuras de acero y cristal azul, verde o gris dan a las avenidas un toque encantador y reluciente espacio... Los pilares de nuestra edificación, jabón, whisky y productos químicos, se han identificado con el avanzado diseño arquitectónico y sus monumentos marchan por la avenida en un orgullo desfile"* Ada Louise <sup>B3</sup>

## BIBLIOGRAFÍA

### ARTÍCULOS

**A1**\_Cornellana Díaz, P. (2015). Poética de la desaparición: Junya Ishigami. *Escola Tècnica Superior D'arquitectura De Barcelona - Grau En Estudis D'arquitectura*.

**A2**\_El hormigón pretensado y postensado. Definición y uso. (2019). Retrieved from <http://www.umacon.com/noticia.php/es/El-hormigon-pretensado-postensado-definicion-uso/417>

**A3**\_García Santabàrbara, A., & Cervera Bravo, J. (2017). Conceptos para la cuantificación del consumo estructural y su aplicación a estructuras generadas por elementos preflectados. *Informes De La Construcción*, 69(546), 201. doi: 10.3989/ic.16.016

**A4**\_Manterola Armisen, J. (1985). La estructura resistente de los edificios altos. *Informes De La Construcción*, 37(371), 5-30. doi: 10.3989/ic.1985.v37.i371.1815

**A5**\_Manterola Armisen, J. (1998). La estructura resistente en la arquitectura actual. *Informes De La Construcción*, 50(456-457), 15-45. doi: 10.3989/ic.1998.v50.i456-457.884

**A6**\_Rodríguez, N. (2010). *Estructura transformable de malla de barras preflectadas*. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción Universidad Central de Venezuela.

### BLOGS

**B1**\_Camacho, M. (2019). LECCIONES DEL EQUILIBRIO. Retrieved from <http://madc-texts.blogspot.com/2014/09/lecciones-del-equilibrio.html>

**B2**\_Construpedia, la Enciclopedia de la Construcción. (2019). Retrieved from <https://www.construmatica.com/construpedia/>

**B3**\_Delgado, J., Invitado, A., Blasco, L., Galdeano, I., & Invitado, A. (2019). Blog de Arquitectura | Revista de Arquitectura online | COSAS de ARQUITECTOS. Retrieved from <https://www.cosasdearquitectos.com/>

**B4**\_pretensado – El blog de Víctor Yepes. (2019). Retrieved from <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/pretensado/>

**B5**\_Table as water : design : junya ishigami : japan. (2019). Retrieved from <https://openhousebcn.wordpress.com/2012/04/25/table-as-water-design-junya-ishigami-japan/>

**B6**\_Tectónica: arquitectura y soluciones constructivas. (2019). Retrieved from <http://tectonicablog.com/?p=65597>

**B7\_** (2019). Retrieved from

[https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1\\_anio/civil1/files/IC%20I-Pretensado.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Pretensado.pdf)

**B8\_** (2019). Retrieved from

<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25641/25/Tema%2025%20-%20Tecnolog%C3%ADa%20del%20pretensado.pdf>

## LIBROS

**L1\_**Allen, E., & Zalewski, W. (2012). *Form and Forces*. Hoboken: John Wiley & Sons.

**L2\_**Barnes, M., Dickson, M., & Happold, E. (2000). *Widespan roof structures*. London: T. Telford.

**L3\_**Beukers, A., & Hinte, E. (2005). *Lightness*. Rotterdam: 010 Publishers.

**L4\_**Billington, D., & Doig, J. (2003). *Robert Maillart's bridges: the art of structural design*. Princeton, N.J.: Princeton University Art Museum.

**L5\_**Block, P., Knippers, J., Mitra, N., & Wang, W. (2015). *Advances in Architectural Geometry 2014 [recurso electrónico]* \$c. Cham.

**L6\_**Brufau i Niubó, R. (2010). *Rehabilitar con acero*. Madrid: APTA.

**L7\_**Gili Galfetti, G. (2002). *Casas refugio*. Barcelona: Gustavo Gili.

**L8\_**Klee, P., Spiller, J., & Norden, H. (1973). *Paul Klee - notebooks*. N.Y.: George Wittenborn.

**L9\_**Leonhardt, F. (1980). *Prestressed Concrete Design and Construction*. W. Ernst.

**L10\_**Maillart, R. (1970). *Arquitectos*. Barcelona: Gustavo Gili.

**L11\_**Nawy, E. (1989). *Prestressed concrete*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

**L12\_**Nilson, A. (1987). *Design of prestressed concrete*. New York: John Wiley & Sons.

**L13\_**Otto, F. (1973). *Estructuras, Estudios y trabajos sobre construcción ligera*. Barcelona: Gustavo Gili.

**L14\_**Otto, F., Songel, J., & Otto, F. (2010). *A conversation with Frei Otto*. New York: Princeton Architectural Press.

**L15\_**Otto, F., Tange, K., Hennicke, J., & Hasegawa, T. (1974). *Grid Shells*. Stuttgart [W. Ger.]: Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart.

**L16**\_Zalewski, W., Allen, E., & Iano, J. (1998). *Shaping structures statics*. New York [NY]: Wiley.

## NORMATIVAS

**N1**\_Código Técnico de la Edificación (CTE)

**N2**\_Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE)

## PÁGINAS WEB

**P1**\_Contraflecha debida al pretensado - Estructurando. (2019). Retrieved from <http://estructurando.net/2017/06/26/contraflecha-debida-al-pretensado/>

**P2**\_Freeness - e-flux Architecture - e-flux. (2019). Retrieved from <https://www.e-flux.com/architecture/positions/191578/freeness/>

**P3**\_Junya Ishigami > Magic Table | HIC Arquitectura. (2019). Retrieved from <http://hicarquitectura.com/2016/11/junya-ishigami-magic-table/>

**P4**\_Lucarelli, F. (2019). The Limits of Rationality: Impossibly Thin Table by Junya Ishigami... Retrieved from <http://socks-studio.com/2016/07/07/the-limits-of-rationality-impossibly-thin-table-by-junya-ishigami-2006/>

**P5**\_Ventana en Blanco. 2005 "Mesa" ( Magic table ). (2019). Retrieved from <http://www.ventanaenblanco.es/detalle/387/2005-mesa-magic-table/>

## REVISTAS

**R1**\_CHURTICHAGA, J. (2008). Con un pie en el otro lado... la difusa frontera entre arquitectura e ingeniería. *Esqueletos*, (185).

**R2**\_Instituto Eduardo Torroja. (2 Noviembre 1987). *Edificios en altura*. Cuadernos de Informes

**R3**\_ITSEMAP. Recuperado de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>

**R4**\_Richard L. Márquez Cecilia, F (2010). Christian Kerez Junya Ishigami. El croquis nº 182.

ISBN 9788488386878

**TESIS**

**T1**\_Rodríguez González, N., Llorens Duran, J., & Sastre i Sastre, R. (2008). *Diseño de una estructura transformable por deformación de una malla plana en su aplicación a un refugio de rápido montaje*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

## BIBLIOGRAFÍA DE IMÁGENES

01. Desconocido (2017). Arquitectura\_casas\_mudhif\_iraq\_exterior (Imagen). Recuperado de: <http://ar.natureiraq.org/1589160815851.html>
02. Desconocido (2017). Maxresdefault (Imagen). Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=-conaQwugvA>
03. Junya.ishigami+associates (2016). Image1\_table (Imagen). Recuperado de: <http://dromanelli.blogspot.com/2016/11/junya-ishigami-magic-table.html>
04. Junya.ishigami+associates (2016). 3cf45d48926ade1320623fa47881ed3e (Imagen). Recuperado de: <https://www.designboom.com/architecture/junya-ishigami-wins-golden-lion-for-best-project-at-the-venice-biennale/>
05. Junya.ishigami+associates (2008). C4gruKpzGtOEL8hmvVw3-8 (Imagen). Recuperado de: <https://www.designboom.com/architecture/junya-ishigami-serpentine-pavilion-london-02-14-2019/>
06. Junya.ishigami+associates (2005). Kait-workshop02 (Imagen). Recuperado de: <https://www.designboom.com/architecture/junya-ishigami-serpentine-pavilion-london-02-14-2019/>
07. Estructura preflectada emparejada. Fase 0: Estado inicial con los tensores. Fase 1: Búsqueda de la forma. Fase 2: Introducción carga exterior (Dibujo). Elaboración propia
08. Nelson Rodríguez (2010). Catenaria descrita por una cadena (Dibujo).
09. Nelson Rodríguez (2010). Comparación de los valores (Dibujo).
10. Desconocido (2017). Arquitectura\_casas\_mudhif\_iraq\_exterior (Imagen). Recuperado de: <http://ar.natureiraq.org/1589160815851.html>
11. Desconocido (2017). Maxresdefault (Imagen). Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=-conaQwugvA>
12. Robert Brufau (2010). Estructura preflectada por gatos hidráulicos en rehabilitación.
13. David Boixader (2017). Hormigón pretensado con armadura sin activar (Dibujo). Recuperado de: <http://estructurando.net/2017/06/26/contraflecha-debida-al-pretensado/>
14. David Boixader (2017). Contra flecha producida por la armadura activa (Dibujo). Recuperado de: <http://estructurando.net/2017/06/26/contraflecha-debida-al-pretensado/>
15. Churtichaga (2008). Puente Blanco (Imagen).
16. Madrid Destino (-). Torres Kio (Imagen). Recuperado de: <https://www.esmadrid.com/informacion-turistica/torres-kio-puerta-europa>
17. Mirador Madrid (2016) Torres Colón (Imagen). Recuperado de:

<http://www.miradormadrid.com/torres-colon-enchufe-art-deco/>

18. Sergio (2010) Torres colón: construcción (Imagen). Recuperado de: <http://m.forocoches.com/foro/showthread.php?t=1933174&page=6>

19. Desconocido (2014). Standard Bank (Imagen). Recuperado de: [farizdh.blogspot.com/2014/](http://farizdh.blogspot.com/2014/)

20. Osorio, C. (2015) Banco de Bilbao (Imagen). Recuperado de: <http://caminandopormadrid.blogspot.com.es/2015/09/la-torre-del-bbva-de-sainz-de-oiza.html>

21. Desconocido (2009). Sección Banco de Bilbao (Imagen). Recuperado de: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Torre\\_del\\_Banco\\_de\\_Bilbao\\_08.jpg](https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Torre_del_Banco_de_Bilbao_08.jpg)

22. Desconocido (2019). U.N. City en Viena (Imagen). Recuperado de: [https://en.wikipedia.org/.../United\\_Nations\\_Office\\_at\\_Vienna](https://en.wikipedia.org/.../United_Nations_Office_at_Vienna)

23. Junya.ishigami+associates (2008). 276b5190df829726814f4934f4190e37 (Imagen). Recuperado de: [https://t4unizar.files.wordpress.com/2018/02/junya-ishigami\\_talleres-kait.pdf](https://t4unizar.files.wordpress.com/2018/02/junya-ishigami_talleres-kait.pdf)

24. Junya.ishigami+associates (2008). C4gruKpzGtOEL8hmvVw3-8 (Imagen). Recuperado de: <https://www.designboom.com/architecture/junya-ishigami-serpentine-pavilion-london-02-14-2019/>

25. Junya.ishigami+associates (2008). Dibujo del arquitecto (Dibujo).

26. Junya.ishigami+associates (2005). Kait-workshop02 (Imagen). Recuperado de: <https://www.kait.jp/english/>

27. Junya.ishigami+associates (-). 1400598084403\_junya.ishigamiassociates\_-\_KAIT\_Workshop\_plan\_S400 (Dibujo). Recuperado de: <https://architizer.com/projects/kanagawa-institute-of-technology-kait-workshop/>

28. Junya.ishigami+associates (2005). Kait-workshop01 (Imagen). Recuperado de: <https://www.kait.jp/english/>

29. Junya.ishigami+associates (2016). 3cf45d48926ade1320623fa47881ed3e (Imagen). Recuperado de: <https://www.designboom.com/architecture/junya-ishigami-wins-golden-lion-for-best-project-at-the-venice-biennale/>

30. Junya.ishigami+associates (-). Dibujo del arquitecto (Dibujo).

31. Junya.ishigami+associates (2010). Ishigami02 (Imagen). Recuperado de: <https://www.designboom.com/architecture/junya-ishigami-wins-golden-lion-for-best-project-at-the-venice-biennale/>

32. David Boixader (2017). Pretensado de la armadura en una viga de hormigón (Dibujo). Recuperado de: <http://estructurando.net/2017/06/26/contraflecha-debida-al-pretensado/>



33. Simplificación estructura preflectada (Dibujo). Elaboración propia
34. Luis Guzman (2018). Prontuario carga uniforme (Imagen). Recuperado de: <https://es.slideshare.net/LuisGuzman276/prontuario-basico-de-estructuras-simples>
35. Luis Guzman (2018). Prontuario momentos en los extremos (Imagen). Recuperado de: <https://es.slideshare.net/LuisGuzman276/prontuario-basico-de-estructuras-simples>
36. Comportamiento cortante y flector estructura preflectada (Dibujo). Elaboración propia
37. Igualación de los momentos positivos (cargas) y negativos (contra flecha) para obtener la flecha igual a 0 (Dibujo). Elaboración propia
38. Momento flector en una estructura preflectada (Dibujo). Elaboración propia
39. Esquema de desplazamientos en una estructura preflectada (Dibujo). Elaboración propia
40. Esquema: resumen de los parámetros de diseño (Dibujo). Elaboración propia
41. Junya Ishigami+associates (2016). Esquema alzado Magic Table (Dibujo). Recuperado de: <http://hicarquitectura.com/2016/11/junya-ishigami-magic-table/>
42. Junya Ishigami+associates (2016). Esquema planta Magic Table (Dibujo). Recuperado de: <http://hicarquitectura.com/2016/11/junya-ishigami-magic-table/>
43. Junya Ishigami+associates (2016). Esquema distribución de fuerzas Magic Table (Dibujo). Recuperado de: <http://hicarquitectura.com/2016/11/junya-ishigami-magic-table/>
44. Junya Ishigami+associates (2016). Construcción tablero Magic Table (Dibujo). Recuperado de: <http://socks-studio.com/2016/07/07/the-limits-of-rationality-impossibly-thin-table-by-junya-ishigami-2006/>
45. Junya Ishigami+associates (2016). Magic Table exposición (Dibujo). Recuperado de: <http://socks-studio.com/2016/07/07/the-limits-of-rationality-impossibly-thin-table-by-junya-ishigami-2006/>
46. Luis Guzman (2018). Prontuario carga uniforme (Imagen). Recuperado de: <https://es.slideshare.net/LuisGuzman276/prontuario-basico-de-estructuras-simples>
47. Luis Guzman (2018). Prontuario momentos en los extremos (Imagen). Recuperado de: <https://es.slideshare.net/LuisGuzman276/prontuario-basico-de-estructuras-simples>
48. Comportamiento cortante y flector estructura preflectada (Dibujo). Elaboración propia
49. Axonometría modelo 0 (Dibujo). Elaboración propia

50. Alzado modelo 0 (Dibujo). Elaboración propia
51. Alzado modelo 1 (Dibujo). Elaboración propia
52. Alzado deformado modelo 1 (Dibujo). Elaboración propia
53. Axonometría modelo 1 (Dibujo). Elaboración propia
54. Axonometría deformada modelo 1 (Dibujo). Elaboración propia
55. Alzado modelo 2 (Dibujo). Elaboración propia
56. Alzado deformado modelo 2 (Dibujo). Elaboración propia
57. Axonometría modelo 2 (Dibujo). Elaboración propia
58. Axonometría deformada modelo 2 (Dibujo). Elaboración propia
59. Alzado modelo 3 (Dibujo). Elaboración propia
60. Alzado deformado modelo 3 (Dibujo). Elaboración propia
61. Axonometría modelo 3 (Dibujo). Elaboración propia
62. Axonometría deformada modelo 3 (Dibujo). Elaboración propia
63. Alzado modelo 4 (Dibujo). Elaboración propia
64. Alzado deformado modelo 4 (Dibujo). Elaboración propia
65. Axonometría modelo 4 (Dibujo). Elaboración propia
66. Axonometría deformada modelo 4 (Dibujo). Elaboración propia
67. Modelo de acero (Imagen). Elaboración propia
68. Modelo de aluminio (Imagen). Elaboración propia
69. Modelo de acero cargado (Imagen). Elaboración propia
70. Modelo de aluminio cargado (Imagen). Elaboración propia
71. Planchas fuera de la base después de ser cargadas (Imagen). Elaboración propia
72. Mapa aéreo de Agres (Imagen). Elaboración propia
73. Planta tipo de la vivienda (Dibujo). Elaboración propia
74. Alzado Norte (Dibujo). Elaboración propia
75. Alzado Sur (Dibujo). Elaboración propia

- 76. Alzado Este (Dibujo). Elaboración propia
- 77. Alzado Oeste (Dibujo). Elaboración propia
- 78. Axonometría vivienda (Dibujo). Elaboración propia
- 79. Axonometría estructural (Dibujo). Elaboración propia
- 80. Esquema trabajo de los soportes (Dibujo). Elaboración propia
- 81. Estructura de cubierta preflectada (Dibujo). Elaboración propia
- 82. Estructura de cubierta con los soportes traccionados (Dibujo). Elaboración propia
- 83. Esquema cargas permanentes (Dibujo). Elaboración propia
- 84. Esquema cargas variables (Dibujo). Elaboración propia
- 85. Esquema de cortantes sin mayorar (Dibujo). Elaboración propia
- 86. Esquema de momento flector sin mayorar (Dibujo). Elaboración propia
- 87. Esquema de cortantes mayorados (Dibujo). Elaboración propia
- 88. Esquema de momento flector mayorado (Dibujo). Elaboración propia

## **ANEXOS**

A continuación se muestran los resultados de los cálculos realizados sobre el proyecto Magic Table con el programa informático SAP2000 y los obtenidos en el laboratorio con el testeo de las maquetas.